



TRABAJO DE FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Departamento de Ingeniería Mecánica

**OPTIMIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL  
PROCEOS DE MECANIZADO ORTOGONAL DEL  
Ti-6Al-4V**

Autor: Ismael Llorente Bermejo

Tutor: Héctor López-Gálvez Muñoz

Junio 2018



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a mi familia, por el apoyo incondicional, la comprensión y la confianza demostrada durante estos años.

A todas aquellas personas que me han acompañado durante esta etapa única, la vida universitaria. Gracias por vuestra sinceridad, cariño y tiempo dedicado.

A Héctor López-Gálvez Muñoz, por su papel como tutor, gracias por la flexibilidad y disponibilidad reflejada en todo momento

Cada uno de vosotros ha aportado un grano de arena durante este camino, gracias por haberme permitido llegar hasta aquí.

*“Aequam memento rebus in arduis servare mentem”*

## RESUMEN

El objetivo de este proyecto es la optimización de la simulación numérica del proceso de mecanizado ortogonal del Ti-6Al-4V. La evolución del uso del titanio en la industria ha sufrido un aumento pronunciado durante los últimos años. Por lo tanto, la reducción del tiempo de simulación en las operaciones de mecanizado es crucial para optimizar el estudio del comportamiento del material.

Las simulaciones numéricas se han ejecutado mediante el software ABAQUS / Explicit. Este software ha permitido realizar la modelización del proceso propuesto en este trabajo, operación de mecanizado, y la correcta emulación del comportamiento del material en la operación de corte, mediante la utilización del modelo Johnson-Cook.

Para alcanzar el objetivo del proyecto, se ha propuesto la utilización de diferentes modelizaciones de la herramienta de corte, realizando una comparación entre ambas. La comparación se ha realizado observando la variación de determinados factores frente a la velocidad de avance y la energía de fractura del material. Los factores observados han sido los siguientes: Las fuerzas de avance y de corte, la morfología de la viruta (analizando el grado de segmentación de la viruta) y la evolución de la temperatura, en la herramienta y en la viruta, durante el proceso de mecanizado.

Las conclusiones obtenidas con base en las investigaciones pasadas han resultado ser útiles para la optimización del modelo de simulación, creando una base de trabajo para futuras investigaciones.

## ABSTRACT

This project's objective is the optimization of the numerical simulation of the orthogonal machining process of Ti-6Al-4V. The evolution in the use of the titanium in the industry has undergone a sharp increase during the last years. Therefore, the reduction of the simulation time in the machining operations is crucial to optimize the study of the behaviour of the material.

The numerical simulations have been executed using the ABAQUS / Explicit software. This software has allowed the performance of the modeling of the proposed process, the machining operation and the correct emulation of the behaviour of the material in the cutting operation, by using the Jhonson-Cook model.

In order to the objective pursued in this project, the use of different modeling of the cutting tool has been proposed, making a comparison between both. The comparison has been made by observing the variation of certain factors in relation with the speed of advance and the fracture energy of the material. The analyzed factors have been the following: The cutting forces, the morphology of the shaving (analyzing the degree of segmentation of the shaving) and the evolution of the temperature, in the tool and in the chip, during the process of mechanized .

The conclusions obtained have been useful for the optimization of the simulation model and have allowed the creation of a database which can be used for future investigations.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Estado del arte.....	1
Morfología de la viruta.....	1
Fuerzas ejercidas durante la operación de mecanizado.....	3
Influencia de la temperatura en el proceso de mecanizado ortogonal del Ti-6Al-4VÇ .....	4
1.2 Objetivos .....	5
<b>2. BASE TEÓRICA.....</b>	<b>7</b>
2.1 El titanio y sus aleaciones.....	7
2.1.1 Propiedades y características [15].....	7
2.1.2 Aleaciones de titanio.....	10
Proceso de formación de las aleaciones de titanio.....	10
Principales aleaciones de titanio.....	12
2.1.3 Aplicaciones del titanio y de sus aleaciones [22].....	16
2.2 Principios del mecanizado.....	19
2.2.1 Partes básicas del centro de mecanizado.....	20
2.2.2 Tipos de operaciones de mecanizado.....	22
2.2.3 Principios básicos sobre el mecanizado.....	25
Mecanizado de Alta Velocidad [26] .....	25
Movimientos relativos al proceso de mecanizado y parámetros de corte.....	26
Mecanizado de Corte ortogonal.....	30
Ángulos.....	31
Velocidades.....	32
Fuerzas.....	34
2.2.4 Viruta en el mecanizado.....	35

Morfología de la viruta. [36] [37].....	36
2.3 Simulación mediante método de elementos finitos y modelo Johnson-Cook. 38	
2.3.1 Modelo Johnson-Cook [39].....	38
2.3.2 Método de elementos finitos.....	40
2.4 Sinopsis del Ti-6Al-4V. ....	42
2.4.1 Estudio del mecanizado del Ti-6Al-4V [42].....	42
2.4.2 Morfología de la viruta del Ti-6Al-4V.....	43
<b>3. ABAQUS/CAE.....</b>	<b>45</b>
3.1 Introducción del software [41].....	45
3.2 Metodología en ABAQUS específica para el mecanizado del Ti-6Al-4V.....	46
3.2.1 Etapa de pre-proceso. ....	46
Módulo PART .....	46
Módulo PROPERTY.....	49
Módulos ASSEMBLY , INTERACTION y LOAD.....	51
3.2.2 Etapa de cálculo. ....	52
Módulo ``MESH`` .....	53
Módulo ``JOB`` .....	54
3.2.3 Etapa de postproceso.....	55
Módulo ``VISUALIZATION`` .....	55
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>58</b>
4.1 Fuerzas de avance y de corte, simulación Ti-6Al-4V.....	59
Influencia de la morfología de la viruta frente a las fuerzas .....	59
Influencia de la velocidad de corte frente a las fuerzas.....	61
Influencia de la energía de fractura sobre las fuerzas .....	62
Resultados experimentales sobre el estudio de las fuerzas del mecanizado del Ti-6Al-4V .....	64

4.2 Análisis de la formación de viruta durante la simulación del mecanizado ortogonal del Ti-6Al-4V. ....	71
Variación de la morfología de la viruta en función de la velocidad de corte.....	71
Variación de la morfología de la viruta en función de la herramienta de corte utilizada .....	73
Variación de la morfología de la viruta en función de la energía de fractura ( $G_f$ )..	74
Verificación de los resultados obtenidos.....	76
4.3 Evolución de la temperatura durante la simulación del mecanizado ortogonal del Ti-6Al-4V. ....	77
<b>5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>81</b>
5.1 Conclusiones .....	81
5.2 Futuras investigaciones .....	83
<b>6. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL .....</b>	<b>84</b>
<b>7. PRESUPUESTO .....</b>	<b>86</b>
Anexos .....	91



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Titanios comercialmente puros. ....	13
Tabla 2. Composición de los elementos químicos presentes en los titanios comercialmente puros [19]. ....	13
Tabla 3. Aleaciones de titanio Alfa-Beta. ....	14
Tabla 4. Aleaciones Alfa-Compuesto y Alfa-SúperAlfa. ....	15
Tabla 5. Aleaciones Beta del titanio. ....	15
Tabla 6. composición del Ti-6Al-4V. ....	42
Tabla 7. Propiedades de la herramienta tipo Sólido. ....	49
Tabla 8. Propiedades de la pieza de trabajo Ti-6Al-4V. ....	50
Tabla 9. Propiedades del Ti-6Al-4V aplicadas en el modelo Johnson-Cook. ....	51
Tabla 10. Valores de la energía de fractura utilizados en las simulaciones de corte del Ti-6Al-4V. ....	51
Tabla 11. Variación de las propiedades básicas de las simulaciones de mecanizado realizadas. ....	58
Tabla 12. Comparación entre las fuerzas de mecanizado del Ti-6Al-4V utilizando herramienta tipo Sólido y tipo Wire. ....	64
Tabla 13. Tabla que muestra los tiempos de procesamiento de todas las simulaciones realizadas. ....	68
Tabla 14. Comparación de las fuerzas de corte y tiempos de simulación: Herramientas, Sólido y Wire, Energías de fractura, $G = 30000, 35000, 40000$ y $45000$ [J/mm <sup>2</sup> ] y Velocidad de corte $v=3$ m/s. ....	69
Tabla 15. Presupuesto del personal implicado en el proyecto. ....	86
Tabla 16. Presupuestos de amortización de los equipos empleados durante el proyecto. ....	86

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Viruta segmentada, resultado obtenido de la investigación de F. Ducobu [4].....	2
Fig. 2. (a) Valor de las fuerzas específicas de corte frente al tamaño de la malla. (b) Gráfica que muestra el tiempo de simulación relacionado con el tamaño de la malla utilizado [5]. .....	3
Fig. 3. Gráfica que muestra la temperatura en el proceso de formación de viruta, velocidad de corte 120 m/min. [3] .....	4
Fig. 4. Rutilo, una de las principales fuentes de extracción del titanio [16].....	7
Fig. 5. Gráfica: Influencia de la temperatura en el límite elástico del titanio y de sus aleaciones [17].....	8
Fig. 6. Influencia del valor RPB en la formación de óxido en un metal [18].....	9
Fig. 7. Diagrama de fases Ti-6Al-4V [19].....	10
Fig. 8. Diagrama de fases $\beta$ indicando la posición de algunas aleaciones de titanio en función de su composición química [20].....	11
Fig. 9. Propiedades de las aleaciones de titanio según su composición de estabilizadores $\alpha$ y $\beta$ [21]. .....	12
Fig. 10. Distribución de los diferentes materiales utilizados en el sector aeronáutico [23]. .....	16
Fig. 11. Prótesis de cadera y de tórax realizadas con titanio [24]. .....	18
Fig. 12. Aplicación del titanio en el deporte [25].....	18
Fig. 13. Mecanizado por abrasión [26].....	19
Fig. 14. Esquema de la operación de mecanizado mediante electroerosión[27].....	20
Fig. 15. Mecanizado por arranque de viruta mediante herramienta con geometría determinada. ....	20
Fig. 16. Carrusel de herramientas de un centro de mecanizado [28].....	22
Fig. 17. Interfaz de usuario centro de mecanizado CNC [28]. ....	22
Fig. 18. Operación de mandrinado [29].....	23

Fig. 19. Torno horizontal [29] .	24
Fig. 20. Operación de fresado [29].	24
Fig. 21. Comparación Vc del mecanizado convencional y MAV [26] .	25
Fig. 22. Gráfica: Evolución de la temperatura de formación de viruta Vs. Vc en diferentes metales[30].	26
Fig. 23. Principales movimientos de la herramienta respecto a la pieza [31].	27
Fig. 24. Esquema de los parámetros utilizados para el cálculo de Vc [32].	28
Fig. 25. Representación variable Va.	29
Fig. 26. Comparación entre el corte ortogonal y el corte oblicuo [33].	30
Fig. 27. Ángulos característicos del corte ortogonal [35].	31
Fig. 28. Velocidades características del mecanizado ortogonal [21].	33
Fig. 29. Representación de las fuerzas mediante el círculo de Merchant [31].	34
Fig. 30. Ejemplo de formación de viruta continua en una simulación de corte ortogonal [3].	36
Fig. 31. Imagen de la morfología de viruta discontinua [38].	37
Fig. 32. Viruta segmentada observada con un microscopio [4].	38
Fig. 33. Variación de la tensión en función de la velocidad de deformación y la temperatura [40].	39
Fig. 34. Análisis del comportamiento de un freno de disco utilizando la herramienta ABAQUS [41].	41
Fig. 35. Desgaste de la herramienta en diferentes aleaciones de titanio [26].	43
Fig. 36. Esquema de formación de viruta segmentada en operación de corte [2].	44
Fig. 37. Logo del software Abaqus [41].	45
Fig. 38. Propiedades y diseño de la herramienta tipo Sólido.	47
Fig. 39. Propiedades y diseño de la herramienta tipo Wire.	47
Fig. 40. Propiedades y diseño de la pieza de trabajo.	48
Fig. 41. Dimensiones de la pieza de trabajo.	49

Fig. 42. Ensamble de la pieza de trabajo con la herramienta tipo Wire. ....	52
Fig. 43. Imagen y características del mallado de la herramienta tipo Sólido. ....	53
Fig. 44. Imagen y características del mallado de la pieza de trabajo. ....	54
Fig. 45. Datos mostrados por el monitor durante la simulación del modelo. ....	55
Fig. 46. Evolución de la temperatura en la herramienta tipo Sólido ( $v = 0.5[m/s]$ ; $E=30000[J/m^2]$ ).....	56
Fig. 47. . Evolución de la evolución de la viruta, modelo herramienta tipo Sólido ( $v =$ $0.5[m/s]$ $E=30000[J/m^2]$ ) .....	56
Fig. 48. Evolución de la Fuerza de corte en el modelo herramienta tipo Sólida ( $v =$ $0.5[m/s]$ $E=30000[J/m^2]$ ) .....	57
Fig. 49. Simulación de mecanizado Ti-6Al-4V utilizando herramienta tipo Sólido ( $E=$ $40000 [J/m^2]$ $v= 3 [m/s]$ ).....	60
Fig. 50. Variaciones provocadas por la morfología de la viruta (Simulación Ti-6Al-4V herramienta tipo Sólido $E= 40000 [J/m^2]$ $v= 3 [m/s]$ ) .....	61
Fig. 51. Evolución de las fuerzas de mecanizado en función de la velocidad ( $E =$ $30000[J/m^2]$ ) .....	62
Fig. 52. Comparación de fuerzas de corte, simulación Ti-6Al-4V herramienta tipo WIRE: $v = 3m/s$ , $E = 25000[J/m^2]$ (gráfica superior) , $E = 75000[J/m^2]$ (gráfica inferior) .....	63
Fig. 53. Gráfica A que muestran el valor de las fuerzas de corte y avance en función de la velocidad de corte, la herramienta y la energía de fractura aplicada ( $E = 30.000[J/mm^2]$ ). .....	65
Fig. 54. Gráfica B que muestran el valor de las fuerzas de corte y avance en función de la velocidad de corte, la herramienta y la energía de fractura aplicada ( $E = 35.000[J/mm^2]$ ). .....	66
Fig. 55. Gráfica C que muestran el valor de las fuerzas de corte y avance en función de la velocidad de corte, la herramienta y la energía de fractura aplicada ( $E = 40.000[J/mm^2]$ ). .....	66

Fig. 56. Gráfica D que muestran el valor de las fuerzas de corte y avance en función de la velocidad de corte, la herramienta y la energía de fractura aplicada ( $E = 45.000[\text{J}/\text{mm}^2]$ ). .....	67
Fig. 57. Comparación de simulaciones, modelo con herramienta tipo Sólido $G_f=30000$ , $35000$ y $40000 [\text{J}/\text{mm}^2]$ , con datos experimentales de fuentes externas. [13] [12]. ....	69
Fig. 58. Comparación de simulaciones, modelo con herramienta tipo Wire $G_f=35.000$ , $40.000$ y $45.000 [\text{J}/\text{mm}^2]$ , con datos experimentales de fuentes externas. [13] [12] ....	70
Fig. 59. Variación de la formación de viruta en función de la velocidad de corte ( Modelo con herramienta tipo Sólido, $G_f = 30.000 [\text{J}/\text{mm}^2]$ , $v = 0.5, 3, 15 [\text{m}/\text{s}]$ ).....	72
Fig. 60. Comparación de la viruta formada con diferentes herramientas e iguales condiciones de contorno ( $G_f = 30.000 [\text{J}/\text{mm}^2]$ $v = 0.5, 3, 15 [\text{m}/\text{s}]$ ).....	73
Fig. 61. Variación de la morfología de la viruta con diferentes energías de fractura ( Desde $G_f = 25.000 [\text{J}/\text{mm}]$ hasta $G_f = 75.000 [\text{J}/\text{mm}]$ ).....	74
Fig. 62. Comparación de morfologías de virutas entre: Modelo herramienta tipo Wire( $G_f=60.000[\text{J}/\text{mm}^2]$ ), herramienta tipo Sólido ( $G_f=30.000[\text{J}/\text{mm}^2]$ ) y experimento de F.Ducobu [4]......	76
Fig. 63. Comparación de las temperaturas máximas experimentadas en el proceso de mecanizado ortogonal del Ti-6Al-4V ( $v = 0.5 \text{ m/s}$ ). ....	78
Fig. 64. Comparación de las temperaturas máximas experimentadas en el proceso de mecanizado ortogonal del Ti-6Al-4V ( $v = 3 \text{ m/s}$ ). ....	79
Fig. 65. Comparación de las temperaturas máximas experimentadas en el proceso de mecanizado ortogonal del Ti-6Al-4V ( $v = 15 \text{ m/s}$ ). ....	80

## 1. INTRODUCCIÓN.

### 1.1 Estado del arte.

El fin de este apartado es mostrar el interés del presente proyecto y el enfoque del estudio realizado. Para ello, se van a analizar artículos de investigación relacionados con el mecanizado de la aleación de titanio Ti-6Al-4V [1] [2] [3] [4] [5], adquiriendo una visión global de los resultados publicados en la actualidad y fijando el objetivo de nuestra investigación.

El presente proyecto está basado en la optimización de la simulación numérica del proceso de mecanizado ortogonal del Ti-6Al-4V. Para alcanzar la optimización del modelo se analizarán diversos factores durante el proceso de mecanizado, las temperaturas en la herramienta de corte y en la viruta, las fuerzas de avance y corte y la morfología de la viruta [1].

Las simulaciones se ejecutarán mediante el software ABAQUS. Explotando las herramientas proporcionadas por programa se procederá a diseñar dos modelos de simulación: El modelo con herramienta tipo Sólido, modelización real de la herramienta, y el modelo con herramienta tipo Wire, modelización simplificada de la herramienta utilizada para optimizar el proceso.

A continuación, se expondrá una contextualización del material de estudio y de su comportamiento frente al mecanizado ortogonal.

El mecanizado de las aleaciones de titanio ha aumentado considerablemente en los últimos años debido a su amplio rango de aplicaciones en las industrias aeroespacial, automovilística, química y médica [6]. Concretamente, el Ti-6Al-4V es una de las aleación de titanio más utilizada según numerosas fuentes [7] [8] [9]. La aleación está formada por un 6% de aluminio y un 4% de vanadio en masa, tal y como manifiesta su propio nombre. La tipología de la aleación es  $\alpha + \beta''$  [10], concretamente posee un 90% en volumen de fase  $\alpha$ .

Una vez introducido el material de trabajo se van a mostrar las peculiaridades que presenta el material a la hora del mecanizado:

#### Morfología de la viruta

Anteriores investigaciones realizadas sobre el Ti-6Al-4V, en la universidad UMONS [4], han determinado la tipología de la viruta y los problemas que ocasiona. La viruta formada durante la operación de mecanizado es de tipo serrada o segmentada. La viruta segmentada se caracteriza por tener forma de sierra o dentada, como se observa en la Figura 1. La formación de esta tipología de viruta induce efectos beneficiosos y dañinos durante la operación de corte.

El beneficio brindado por la viruta segmentada es la gran fragmentación de la viruta, facilitando una sencilla evacuación de la viruta. Por otro lado, existen problemas directamente relacionados con la segmentación de la viruta. El principal problema ocasionado es el aumento de las vibraciones durante la operación de corte, induciendo un prematuro desgaste de la herramienta de corte y modificando el acabado superficial de la pieza.

La conclusión obtenida tras finalizar la investigación se reduce en minimizar el grado de segmentación de esta tipología de viruta. En el caso específico del material de estudio, Ti-6Al-4V, se obtuvieron los parámetros necesarios para la formación de viruta con un tamaño menor de diente, disminuyendo las consecuencias dañinas durante la operación.

Durante la realización del presente proyecto, se modelará la operación de mecanizado basándose en los parámetros obtenidos durante la investigación:

La profundidad de corte durante la operación de mecanizado se caracterizará con valores poco elevados, del orden de 50  $\mu\text{m}$ . Una profundidad de corte elevada favorece el aumento del tamaño de los dientes de la viruta, favoreciendo un elevado grado de segmentación de la viruta [11]. Así mismo, se realizarán variaciones de la velocidad de corte y la energía de fractura, estudiando su influencia sobre la morfología de la viruta en cada uno de los modelos diseñados (modelo con herramienta tipo Sólido y con herramienta tipo Wire).

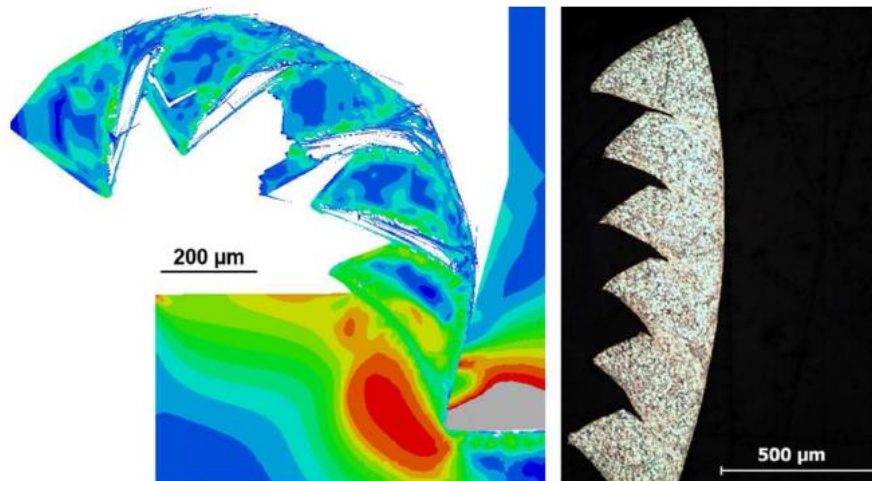


Fig. 1. Viruta segmentada, resultado obtenido de la investigación de F. Ducobu [4]

## Fuerzas ejercidas durante la operación de mecanizado

En el proceso de mecanizado se medirán diferentes valores de las fuerzas del sistema de estudio. Para la verificación de los resultados obtenidos se realizará una comparación entre diferentes investigaciones [5] [12] [13], todas ellas relacionadas con las fuerzas originadas durante el mecanizado del Ti-6Al-4V.

En dichas investigaciones se muestran los valores de los parámetros utilizados durante el desarrollo de las simulaciones numéricas. La aplicación de estos parámetros genera un valor en las fuerzas similar al que se obtendría durante una operación de mecanizado real.

Durante la realización del modelado del conjunto, mediante la aplicación del software de cálculo numérico, se puntualiza la importancia de un correcto diseño del tamaño de la malla. A partir de un determinado tamaño de malla los valores de las fuerzas de corte difieren de los reales. En la figura 2 se observa la variación del valor de las fuerzas con relación al tipo de malla utilizada:

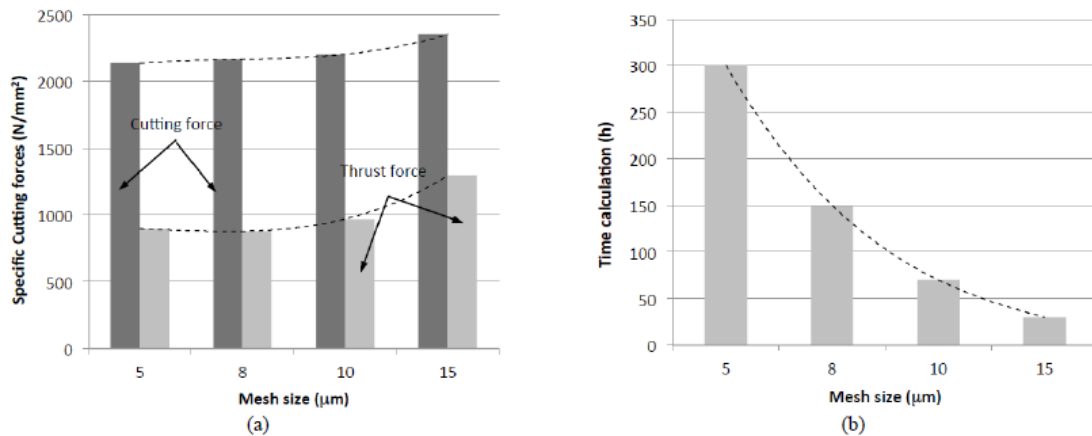


Fig. 2. (a) Valor de las fuerzas específicas de corte frente al tamaño de la malla. (b) Gráfica que muestra el tiempo de simulación relacionado con el tamaño de la malla utilizado [5].

Analizando las gráficas de la figura 2 se concluyó que la optimización del mallado se obtiene aplicando una malla de tamaño 8  $\mu\text{m}$ . Este valor se obtiene como el equilibrio del tiempo de simulación con respecto a la veracidad de los resultados obtenidos en la simulación.

En el presente proyecto, el diseño de la malla se realizará asumiendo los avances establecidos en las citadas investigaciones. Las fuerzas generadas serán fruto de la variación de la energía de fractura del material, la velocidad de corte y la herramienta de corte utilizada. Durante el desarrollo del proyecto se realizarán las simulaciones necesarias con cada una de las herramientas, para posteriormente confirmar su validez mediante la comparación de los resultados con los obtenidos en investigaciones pasadas.



Además, se compararán los resultados obtenidos de los diferentes modelos de simulación con el fin de relacionar los valores obtenidos con las fuerzas de fractura utilizadas, analizando si la herramienta tipo Wire optimiza el proceso.

### Influencia de la temperatura en el proceso de mecanizado ortogonal del Ti-6Al-4V

El último factor del proyecto está relacionado con la influencia de la temperatura durante el proceso de mecanizado, analizando la influencia de la herramienta utilizada, la velocidad de corte y la energía de fractura del material.

Para el correcto análisis de la temperatura se analizarán los resultados obtenidos con estudios previos que relacionan la temperatura con la morfología de la viruta [3]. Además, muestran la distribución de la temperatura en la herramienta y la relación directa con la formación de viruta segmentada.

El aumento de temperatura favorece la aparición de viruta segmentada, debido a que aumenta las bandas de cizalladura de la viruta, causantes de la segmentación del material [14], la figura 3 muestra el efecto de la temperatura frente a la formación de bandas de cizalladura:

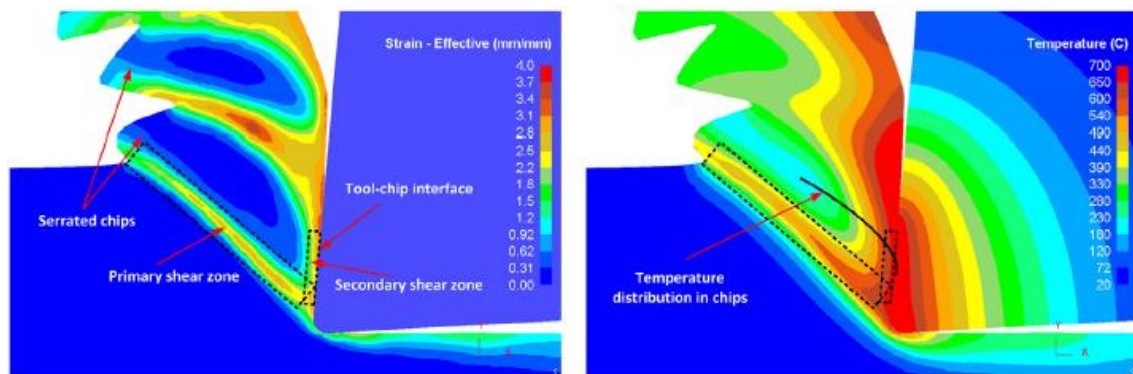


Fig. 3. Gráfica que muestra la temperatura en el proceso de formación de viruta, velocidad de corte 120 m/min. [3]

A lo largo de los tres apartados anteriores se ha realizado una visión general de las investigaciones realizadas hasta la actualidad. Estas investigaciones serán la base de nuestro estudio, comparando los resultados obtenidos con los publicados en las investigaciones para probar la veracidad de estos. Una vez comprobado que los resultados son fiables, las conclusiones obtenidas en nuestro proyecto de investigación estarán definidas sobre unas bases firmes.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es optimizar el modelo de mecanizado 2D utilizado para simular la mecanización de la aleación de titanio Ti-6Al-4V. Las simulaciones se realizarán mediante el software ABAQUS y se utilizarán diferentes tipos de herramientas para las mecanizaciones simuladas.

Para conseguir este objetivo deberemos cumplir los siguientes hitos:

- Realizar un estudio de proyectos anteriores relacionados con la simulación de Ti-6Al-4V, obteniendo una visión preliminar del tema a desarrollar y un punto de partida desde el cual comenzar la investigación del proyecto.
- Contextualizar la introducción del titanio, y posteriormente de sus aleaciones, en el sector industrial, analizando las ventajas competitivas sobre otros materiales y las desventajas de las propiedades de estos materiales.
- Comprender las limitaciones del material en el proceso de mecanizado y entender los beneficios que puede provocar la optimización del proceso.
- Presentar las variables más determinantes en el proceso de mecanizado de la aleación Ti-6Al-4V. Una vez conocidos las variables, se realizará una propuesta estimando los límites numéricos de cada variable enfocándolos a futuras simulaciones.
- Modelizar correctamente el proceso de mecanizado del Ti-6Al-4V mediante el software ABAQUS, manteniendo la fidelidad en todos los parámetros propios de una operación de arranque de viruta (inclinación de la herramienta...).
- Realizar, mediante análisis de elementos finitos, la simulación del proceso de mecanizado del Ti-6Al-4V. Se realizarán simulaciones variando diversos parámetros relacionados con la herramienta, el elemento de estudio (Ti-6Al-4V) o con la operación de corte.
- Representar e interpretar los resultados obtenidos, comparando la influencia provocada por la variación de cada parámetro sobre el resultado final.
- Analizar la morfología de la viruta obtenida en las simulaciones de ambos modelos (Herramienta tipo Sólido y Wire), obteniendo los parámetros exactos con los cuales la viruta obtenida es la viruta objetivo o ideal.

- Verificar la fiabilidad de los valores de las fuerzas obtenidos, obteniendo una relación entre los valores obtenidos mediante la simulación de los modelos con diferente herramienta.
- Verificar la influencia de la temperatura para la formación de viruta segmentada, confirmando el aumento de temperatura en el modelo con herramienta tipo Wire.
- Analizar la optimización de los tiempos de simulación, mediante el análisis de las fuerzas y morfología de viruta obtenida, tras la utilización de la herramienta tipo Wire.
- Realizar una comparación entre los resultados obtenidos de las simulaciones y los datos obtenidos mediante el estudio experimental, realizando las conclusiones necesarias.

## 2. BASE TEÓRICA.

En este apartado se van a exponer los conocimientos previos necesarios para contextualizar el presente proyecto, dividiendo el estudio teórico en varios ámbitos.

El primer ámbito se centrará en el titanio y sus aleaciones, concretamente en el Ti-6Al-4V. En este apartado se mostrarán las características, propiedades y aplicaciones generales del material de estudio.

En segundo lugar, se definirá el mecanizado de una forma general para posteriormente centrarse en el mecanizado ortogonal. Tras explicar ambos conceptos se relacionarán con las aleaciones de Ti-6Al-4V y sus problemas frente al mecanizado.

Para concluir, se explicará el proceso de formación de viruta mediante el mecanizado ortogonal, mostrando la importancia de las condiciones de contorno en la morfología de la viruta.

### 2.1 El titanio y sus aleaciones.

#### 2.1.1 Propiedades y características [15].

El titanio fue descubierto en 1791, es un metal muy abundante en la corteza terrestre, superado por otros metales como el magnesio, el hierro y el aluminio. Debido a su alta reactividad es complicado encontrar titanio puro en la naturaleza, su obtención se encarece al obtener el metal mediante el tratamiento de diferentes materiales, como el rutilo, mostrado en la Figura 4.



*Fig. 4. Rutilo, una de las principales fuentes de extracción del titanio [16]*

El titanio es un elemento químico perteneciente a los elementos de transición de la tabla periódica y su símbolo químico es Ti. Los elementos de transición se encuentran en la parte central de la tabla periódica, todos estos elementos poseen características comunes. Las principales características que presentan estos elementos son su gran dureza, sus altos puntos de fusión y ebullición...Ahora se van a analizar las propiedades del titanio, dividiéndose las propiedades en dos grupos, en propiedades físicas y propiedades químicas:

- Las propiedades físicas del titanio son sorprendentes, es un material con una gran dureza, convirtiéndose en uno de los metales con mayor proporción dureza/densidad. Por lo tanto, es un material ligero que posee una densidad de  $4507 \text{ kg/m}^3$ . El titanio se caracteriza por poseer una gran resistencia térmica, con un punto de fusión aproximado de 1941 K y un punto de ebullición de 3560 K; a pesar de poseer un punto de fusión tan elevado algunas propiedades como la resistencia mecánica disminuye notablemente al aumentar la temperatura, como se puede observar en la Figura 5.

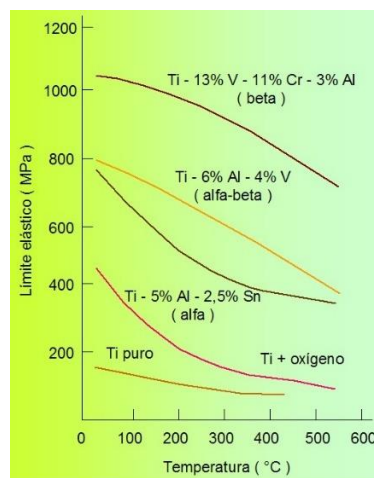


Fig. 5. Gráfica: Influencia de la temperatura en el límite elástico del titanio y de sus aleaciones [17].

Una propiedad que no se puede pasar por alto es la baja conductividad del material, tanto térmica como eléctrica, propiedad causante de la mayoría de las dificultades a la hora de manipular el material.

- El uso generalizado del titanio se debe a sus propiedades químicas, especialmente destaca su gran resistencia a la corrosión. Tanto el titanio como sus aleaciones reaccionan con el oxígeno, provocando su oxidación. Al reaccionar con el oxígeno

se forma una capa de  $\text{TiO}_2$  (óxido de titanio) que proporciona gran resistencia ante la corrosión.

La superficial capa de óxido impide la corrosión del titanio, propiedad ocasionada a causa del grosor de la capa de óxido. El grosor tiene que ser suficientemente pequeño como para evitar el agrietamiento del material y, su posterior exposición al aire, lo que causaría la reacción de oxidación sobre mayor superficie de titanio. Pero, al mismo tiempo, el óxido tiene el grosor necesario para cumplir una función protectora.

Cumple en la proporción adecuada de la relación Pilling-Bedworth [18]. La relación Pilling-Bedworth ( $R_{PB}$ ) es la proporción existente entre el volumen de óxido y el volumen del metal, como se puede observar:

$$R_{PB} = \frac{V_{\text{óxido}}}{V_{\text{metal}}} = \frac{M_{\text{óxido}} \cdot \rho_{\text{metal}}}{n \cdot M_{\text{metal}} \cdot \rho_{\text{óxido}}} \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde:

- $R_{PB}$  corresponde a la relación Pilling-Bedworth.
- $M$  corresponde a la masa del material.
- La  $V$  es el volumen.
- $\rho$  se identifica con la densidad.
- $n$  es la relación atómica entre los átomos del metal con las moléculas del óxido.

En la Figura 6, se observa los diferentes estados de oxidación que puede experimentar un material.

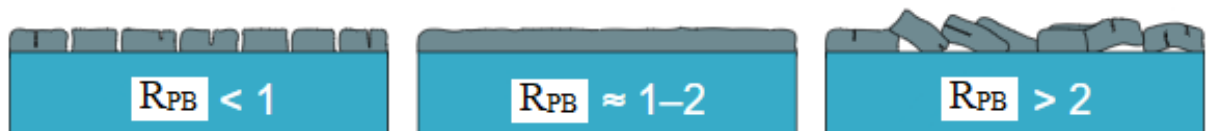


Fig. 6. Influencia del valor  $R_{PB}$  en la formación de óxido en un metal [18].

En la imagen se pueden observar claramente tres metales con sus respectivas capas de óxido.

En primera parte de la imagen, la relación de Pilling-Bedworth es menor que 1. En consecuencia, el volumen de óxido es menor que el volumen de metal y no es capaz de cubrir su superficie. En este caso el óxido no aporta protección al metal. La parte central de la imagen muestra el fenómeno deseable frente a la oxidación. La relación Pilling-Bedworth se encuentra entre los valores 1 y 2, por tanto, el óxido es capaz de cubrir la superficie del metal comportándose como una capa protectora.

La parte derecha de la imagen se caracteriza por tener un volumen de óxido mucho mayor que el volumen del metal. Esto sucede cuando la relación Pilling-Bedworth es mayor que 2 y sus consecuencias son igual de perjudiciales que el primer caso. La formación de óxido comienza a ser tan elevada que la capa formada se empieza a agrietar exponiendo el metal, por lo tanto, no protege la superficie del metal que continúa oxidándose.

### 2.1.2 Aleaciones de titanio.

#### *Proceso de formación de las aleaciones de titanio.*

Las aleaciones de titanio se forman para mejorar las propiedades intrínsecas del material. Mediante la ayuda de los diagramas de fases se observa con claridad las diferentes aleaciones que el titanio forma. La Figura 7 muestra la aleación de Ti 6Al en función del elemento Vanadio, el diagrama está formado por dos fases ( $\alpha$  y  $\beta$ ) y una interfase ( $\alpha + \beta$ ) creada a partir de las fases que la cercan [19].

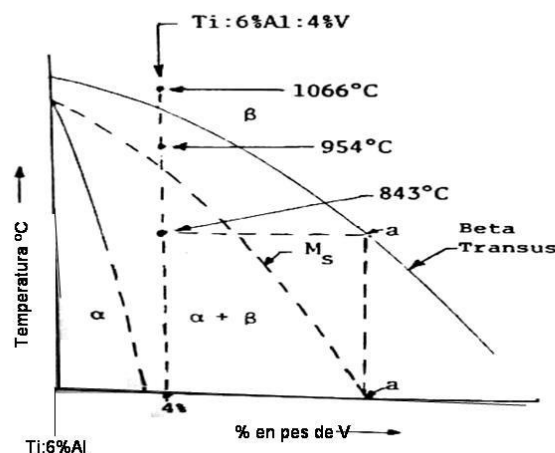


Fig. 7. Diagrama de fases Ti-6Al-4V [19].

El titanio sufre un cambio en su estructura atómica durante el transcurso de las fases. Cuando el elemento se sitúa en la fase  $\alpha$  posee una estructura atómica hexagonal compacta. Pero no mantiene la estructura constante, a medida que el elemento avanza hacia la fase  $\beta$  experimenta una transformación a estructura cúbica centrada en el cuerpo.

La principal consecuencia de los elementos que forman aleaciones con el titanio es la de modificar la temperatura de transformación, por lo cual se pueden clasificar en dos grupos : Los elementos de aleación que aumentan la temperatura de transformación, elementos  $\alpha$ , y aquellos elementos que reducen la temperatura de transformación, elementos  $\beta$ .

- Como se ha mencionado anteriormente, los elementos  $\alpha$ , elevan la temperatura de transformación del titanio. Los principales elementos estabilizadores  $\alpha$  son el aluminio (2-7 % Al en peso), estaño ( 2-6 % Sn en peso), el oxígeno o el galio. El uso de elementos  $\alpha$  provoca que en las aleaciones no se realicen endurecimientos mediante tratamientos térmicos, en general suelen utilizarse en estado de recocido. La principal propiedad física que adquieren estos materiales es el aumento de la resistencia a tracción en condiciones de temperatura ambiente, alcanzando valores comprendidos entre 500 y 950 MPa. Otras propiedades que mejoran son la soldabilidad, el comportamiento a fluencia y la estabilidad térmica hasta los 823 K.

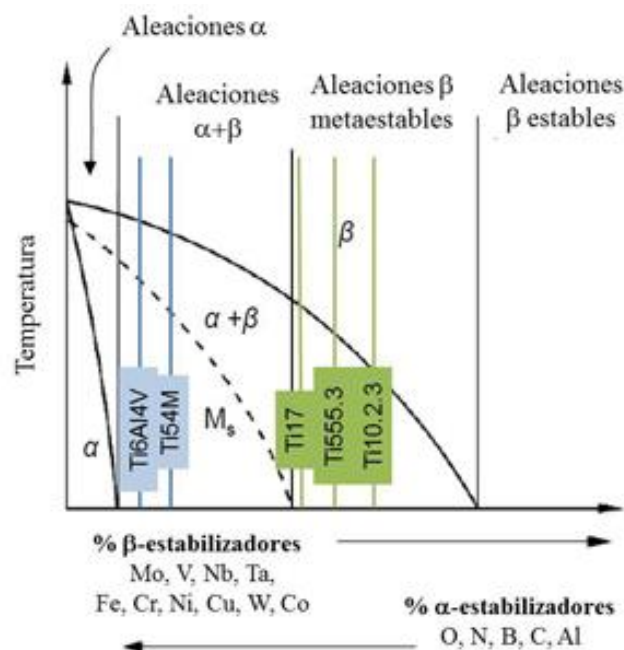


Fig. 8. Diagrama de fases  $\beta$  indicando la posición de algunas aleaciones de titanio en función de su composición química [20].



- Los principales elementos **6** se muestran en la Figura 8, entre ellos destacan los siguientes: Vanadio (2-20 % V en peso), Molibdeno (2-20 %Mo en peso), Cromo (2-12 % Cr en peso) y Cobre (2-6 % Cu en peso), se caracterizan por disminuir la temperatura de transformación del titanio.

Las propiedades de las aleaciones  $\beta$  mejoran cuando  $\alpha$  y  $\beta$  coexisten, este escenario se provoca realizando un tratamiento de envejecimiento sobre el material. Tras el proceso de envejecimiento pequeñas partículas  $\alpha$  precipitan en el interior de los granos  $\beta$ .

Las propiedades físicas más destacables de estos materiales son la facilidad para conformar en frío el material recocido, una vez realizado el conformado el material puede ser tratado térmicamente, mejorando su resistencia mecánica. Además, aumentan la resistencia a fluencia y reducen la ductilidad elementos como el circonio.

Por lo tanto, las aleaciones de titanio se pueden clasificar en tres grupos:  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\alpha+\beta$ . Sus propiedades se resumen en la Figura 9.

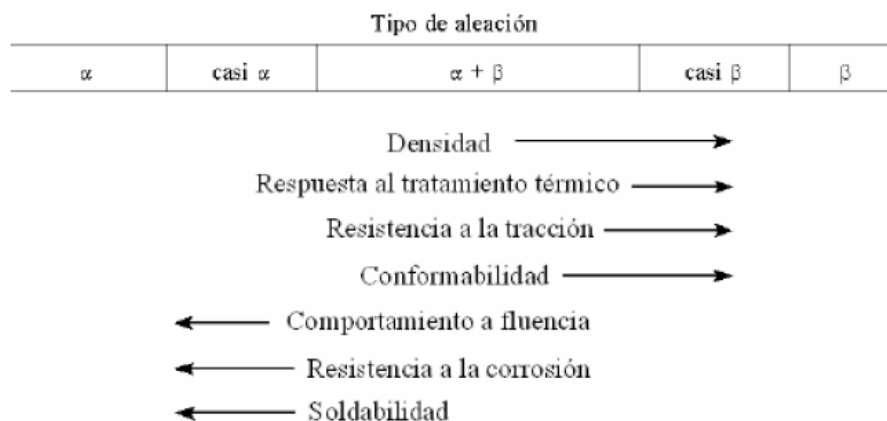


Fig. 9. Propiedades de las aleaciones de titanio según su composición de estabilizadores  $\alpha$  y  $\beta$  [21].

### Principales aleaciones de titanio

Anteriormente, se han clasificado las aleaciones del titanio en tres grupos,  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\alpha+\beta$ . En este apartado se van a definir las diferentes aleaciones de titanio que se pueden formar combinando, en diferentes proporciones, los estabilizadores  $\alpha$  y  $\beta$ .

En primer lugar, se van a mostrar los diferentes titanios “puros” que se comercializan en el mercado actual. Estos materiales se dividen en cuatro grados (norma ASTM), el grado 1 corresponde al material con mayor proporción de titanio y el grado 4 al material con menor

proporción de titanio, recordando en todo momento que cualquiera de los grados se considera titanio ``puro``.

Tabla 1. Titanios comercialmente puros.

Grupo	Designación numérica	Designación simbólica	Norma UNE
L-70XX Titanio	L-7001	Ti 99.6	38-711
	L-7002	Ti 99.4	38-712
	L-7003	Ti 99.2	38-713
	L-7004	Ti 99.0	38-714

Como se observa en la Tabla 3-2 , cada grado de titanio, según la norma ASTM, garantiza unos límites de composición mínima y máxima de numerosos elementos. Las propiedades del titanio, tales como la resistencia mecánica, la dureza y la elasticidad , mejoran según se avanza el grado.

El grado 1 es el más maleable de todos y, debido a esto, su principal uso es el repujado ( técnica artesanal para trabajar planchas de metales blandos y maleables). El titanio de grado 2 es el más abundante y el más comercializado, en contraposición al titanio grado 3 que es el menos común. Por último, el titanio grado 4 se utiliza para la fabricación de piezas que requieran resistencia a la corrosión y elasticidad.

Tabla 2.Composición de los elementos químicos presentes en los titanios comercialmente puros [19].

Grado (ASTM)		1	2	3	4
Designación UNE		L-7001	L-7002	L-7003	L-7004
Composición (%)	N máx.	0.03	0.03	0.05	0.05
	C máx.	0.10	0.10	0.10	0.10
	H máx.	0.015	0.015	0.015	0.015
	O máx.	0.18	0.25	0.35	0.40
	Fe máx.	0.20	0.30	0.30	0.50
	Otros: cada uno	0.05	0.05	0.05	0.05
	total	0.3	0.3	0.3	0.3
Propiedades (*)	Ti mín.	99.5	99,2	99,1	99,0
	$\sigma_m$	240	340	450	550
	$\sigma_{0.2}$	170	280	380	480
	$\epsilon$ (%)	28	25	20	15

Dentro de las aleaciones de titanio se encuentran las aleaciones Alfa-Beta, enumeradas en la Tabla 3. En este grupo de aleaciones encontramos el titanio L-7301, **Ti-6Al 4V**, material en el cual se centra el estudio de este proyecto. Las aleaciones  $\alpha+\beta$  son las más utilizadas en la

industria, aproximadamente la mitad de las aleaciones utilizadas son de este tipo. Aunque son menos maleables las aleaciones  $\alpha$ , destacan propiedades físicas como su alta resistencia mecánica o la capacidad de ser tratados térmicamente. Otra gran característica de estos materiales es la gran soldabilidad, con una eficacia cercana al 100%.

El titanio L-7301 es una aleación Alfa-Beta compuesta por un 6% de aluminio y un 4% de vanadio, se caracteriza por su gran resistencia térmica y mecánica proporcionada por el alto porcentaje de aluminio. Esta tipología de aleaciones permite tratamientos térmicos, lo cual aumenta algunas propiedades físicas como un gran aumento en la tensión admisible.

Tabla 3. Aleaciones de titanio Alfa-Beta.

Grupo	Designación numérica	Designación simbólica	Norma UNE
L-73XX	L-7301	Ti-6 Al 4V	38-723
$\alpha + \beta$	L-7302	Ti-4 Al Mo V	38-724
	L-7303	Ti-6 Al 6 V Sn	38-725
	L-7304	Ti-8 Mn	38-726
	L-7305	Ti-7 Al Mo	38-727
	L-7306	Ti-6 Al 6 Mo Zr Sn	38-728

Las aleaciones alfa del titanio más comunes están compuestas por aluminio (5% en peso) y estaño (2,5% en peso) . Normalmente a este tipo de aleaciones se les realiza un recocido en la zona beta para posteriormente enfriarlo, según el método de enfriamiento el acabado del material varía:

Se obtiene un grano acicular fino al realizar un enfriamiento rápido. Por el contrario, si se procede a realizar un enfriamiento progresivo en un horno, la estructura microscópica del material se modifica formando una estructura de placas.

Las principales propiedades de estas aleaciones no destacan en comparación al resto de aleaciones, se caracterizan por poseer una resistencia media ante la corrosión y la oxidación. La ductilidad, soldabilidad y conformabilidad del material es admisible.

En la Tabla 4 se encuentran clasificadas las principales aleaciones Alfa, Súper Alfa y aleaciones Alfas con compuestos.

Tabla 4. Aleaciones Alfa-Compuesto y Alfa-SúperAlfa.

Grupo	Designación numérica	Designación simbólica	Norma UNE
L-75XX $\alpha + \text{compuesto}$	L-7501	Ti-2,5 Cu	38-722
L-71XX $\alpha$ y súper $\alpha$	L-7101	Ti-5 Al Sn	38-716
	L-7102	Ti-8 Al V Mo	38-717
	L-7103	Ti-6 Al 4Zr Mo Sn	38-718
	L-7104	Ti-6 Al 5 Zr Si	38-719
	L-7105	Ti-11 Sn Zr Al	38-720
	L-7106	Ti-6 Al Nb	38-721

Por último, se encuentran las aleaciones beta. Para obtener estructuras completamente beta a temperatura ambiente hay que añadir al titanio grandes porcentajes de vanadio y/o molibdeno, en la realidad pocas aleaciones se encuentran en esta región. Normalmente destaca el uso de estabilizadores beta, que tras el recocido del material la estructura resultante se compone únicamente de Beta.

Para obtener resistencias mayores se recurre a envejecer el material, aumentando su uso en el sector industrial encontrándose en vigas y numerosas piezas del sector industrial.

En la Tabla 5 se observan las principales aleaciones Beta utilizadas en la industria:

Tabla 5. Aleaciones Beta del titanio.

Grupo	Designación numérica	Designación simbólica	Norma UNE
L-77XX	L-7701	Ti-13 V Cr Al	38-729
$\beta$	L-7702	Ti-12 Mo Zr Sn	38-730

### 2.1.3 Aplicaciones del titanio y de sus aleaciones [22].

En las últimas décadas, el aumento del uso del titanio en numerosos sectores industriales ha sido imparable. Lo que comenzó siendo para la industria un material costoso y poco atractivo, pronto se convirtió en un metal con numerosas posibilidades gracias a sus propiedades, y todo ello promovido por la industria aeronáutica. Hoy en día es un material cada vez más utilizado en numerosos campos, de los cuales destacan:

- Sector aeronáutico: Cualquier empresa dedicada a la fabricación de aeronaves se tiene que enfrentar a un gran reto, la búsqueda de materiales ligeros que soporten los grandes aumentos de temperatura provocados por la fricción aerodinámica.

Gracias a la gran resistencia mecánica y térmica se utilizan aleaciones de titanio para la fabricación de turbinas, conductos de aire, escapes, soportes de las turbinas, tren de aterrizaje... En la figura 10 se observa la proporción de titanio utilizado en la industria aeronáutica.

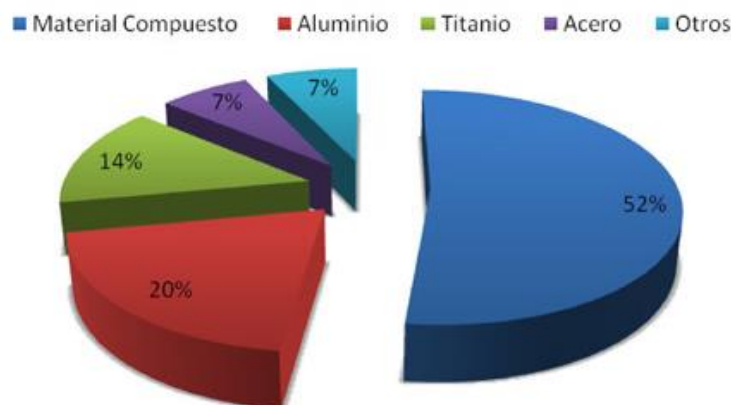


Fig. 10. Distribución de los diferentes materiales utilizados en el sector aeronáutico [23].

- Sector aeroespacial: El principal consumidor de titanio es la industria aeroespacial. Un material que vaya a ser utilizado en una aeronave debe cumplir unos requisitos, entre los que destacan:

Baja fricción, gran resistencia, estabilidad frente a choque térmico y a altas temperaturas, aislamiento eléctrico y de altos voltajes...

Las aleaciones de titanio cumplen con estos requerimientos además de poseer otras ventajas. Se trata de un material ligero que no se desgasta fácilmente, por lo que su uso puede optimizar el rendimiento de las aeronaves frente a ambientes extremos.

- Industria química: En la actualidad, las dos grandes industrias consumidoras de titanio son la industria química y la industria aeroespacial, arrebatándole el liderazgo a la industria aeronáutica.

La industria química se aprovecha de una de las propiedades del titanio, su gran resistencia ante la corrosión. Uno de los problemas de la producción o sintetización de sustancias químicas es la corrosión de las propias máquinas. En consecuencia, la industria química ha realizado grandes inversiones en la adquisición de maquinaria y herramientas resistente a la corrosión.

El titanio y sus compuestos también son importantes a la hora de sintetizar una gran variedad de productos químicos. Algunos de los productos sintetizados son catalizadores (fabricados mediante cloruros de titanio), polipropileno plástico y multitud de productos químicos orgánicos.

- Ámbito sanitario: El principal motivo de la rápida extensión del titanio en el ámbito sanitario ha sido la gran compatibilidad de este material con los tejidos humanos.

A causa de esto, no es de extrañar que multitud de herramientas médicas estén fabricadas con este material. Desde elementos quirúrgicos hasta objetos útiles para los pacientes como muletas o sillas de ruedas se fabrican con titanio, debido a su alta resistencia y bajo peso. Además, no hay que olvidar las numerosas prótesis (cadera, rodilla, bucales...), tornillos, clavos... realizadas en este mismo material. En la Figura 11 se muestran diferentes prótesis realizadas con titanio.

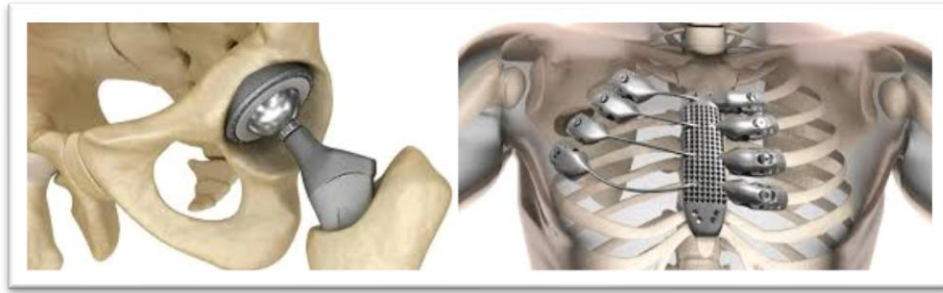


Fig. 11. Prótesis de cadera y de tórax realizadas con titanio [24].

- Otras aplicaciones: En la sociedad actual son numerosos los ejemplos del uso del titanio en actividades propias del día a día.

El óxido de titanio se caracteriza por la pureza de su color blanco, a causa de esta propiedad la industria lo ha utilizado para teñir objetos tan dispares como el dentífrico, el papel, la pintura...

En el ámbito deportivo también se ha expandido la utilización de este metal. Podemos encontrar titanio en numerosos deportes, desde las raquetas de tenis hasta las bicicletas pasando por cascos utilizados en diferentes deportes, en la Figura 12 se muestran un cuadro de bicicleta y una raqueta fabricadas de titanio.

Tan presente está en la sociedad que hasta en la construcción de algunos edificios se ha utilizado este metal.



Fig. 12. Aplicación del titanio en el deporte [25].

## 2.2 Principios del mecanizado.

La mecanización es uno de los procesos industriales más importantes dentro del sector metalmecánico. El proceso industrial de mecanizado se define como un proceso de fabricación, formado por diferentes operaciones unitarias aplicadas sobre productos semielaborados para obtener un producto final o un producto semielaborado que requiera de posteriores operaciones.

A partir de la materia prima, normalmente lingotes o barras metálicas de geometría sencilla, se obtiene la pieza final mediante un proceso de mecanizado. Consiguiendo así piezas muy diversas en cuanto a tamaño y formas.

Los procesos de fabricación pueden clasificarse según la forma de corte:

### Mecanizado por abrasión:

El mecanizado por abrasión consiste en la eliminación de material mediante el uso de herramientas abrasivas sin un filo definido. Normalmente la herramienta está formada por pequeñas partículas abrasivas unidas mediante un aglutinante, la Figura 13 muestra un proceso de mecanizado por abrasión.

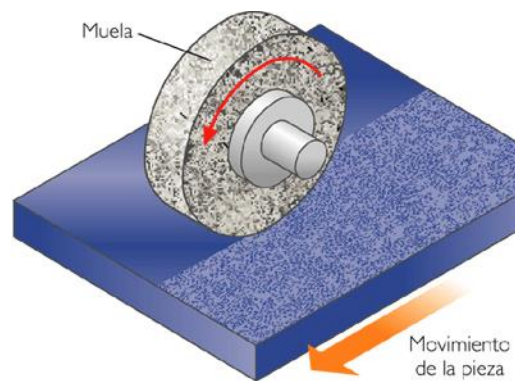


Fig. 13. Mecanizado por abrasión [26].

Las ventajas más significativas de las operaciones de abrasión son su gran calidad superficial resultante y la capacidad de mecanizar elementos de gran dureza.

Las principales operaciones de mecanizado por abrasión son la rectificación y la electroerosión (Figura14) [27], método que utiliza sucesivas descargas eléctricas para arrancar partículas del material. La operación de electroerosión se utiliza para arrancar material de elementos muy duros, esto se debe a que la operación se realiza sin mantener contacto con el material evitando el desgaste de la herramienta.



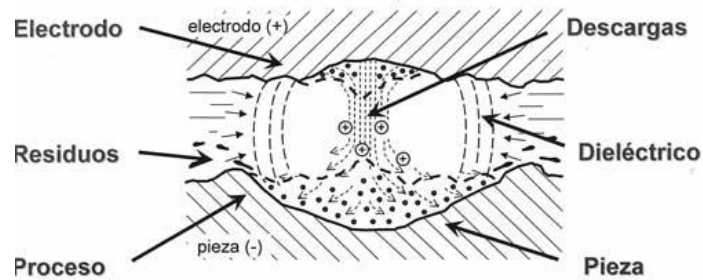


Fig. 14. Esquema de la operación de mecanizado mediante electroerosión[27].

### Mecanizado por arranque de viruta:

El mecanizado por arranque de viruta se caracteriza por la utilización de herramientas con filos geoméricamente determinados, lo que permite obtener piezas con geometrías y tamaños variables. Durante la operación el material es cortado dando lugar a viruta, como se observa en la Figura 15.

Existen dos etapas bien diferenciadas en el mecanizado por arranque de viruta, la primera etapa se aplica cuando hay que eliminar gran cantidad de material de una forma poco precisa, etapa de desbaste. La etapa posterior es la etapa de acabado, es el proceso final y consiste en la eliminación de poco material de una forma muy precisa.

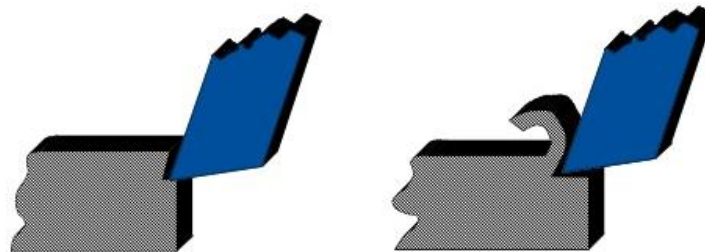


Fig. 15. Mecanizado por arranque de viruta mediante herramienta con geometría determinada.

#### 2.2.1 Partes básicas del centro de mecanizado.

Una vez explicados los conceptos básicos de la mecanización y tras clasificar los tipos de mecanizado según la herramienta utilizada (definida geoméricamente o no definida geoméricamente), se van a analizar las principales partes de un centro de mecanizado:

- Bancada : La bancada de un centro de mecanizado es la superficie en la cual se encuentran los sistemas de sujeción de un centro de mecanizado. Es una parte de la máquina que tiene gran importancia, pues las uniones entre la pieza a mecanizar y el sistema de sujeción tiene que ser sólida para evitar vibraciones que imposibiliten un acabado óptimo en la pieza.
- Sistemas de lubricación y refrigeración : El sistema de refrigeración es totalmente necesario en operaciones de corte de tan alto rendimiento debido al gran aumento de la temperatura debido a la fricción. El elemento utilizado para refrigerar y lubricar tanto la herramienta como la pieza es la taladrina. La taladrina es un líquido compuesto de aceite y agua, circula por un circuito de refrigeración que bombea el líquido sobre la herramienta evitando el sobrecalentamiento, así como previniendo un prematuro deterioro de la herramienta.
- Husillos: En los centros de mecanizado la herramienta es la encargada de realizar el movimiento, por lo cual es uno de los elementos más importantes del conjunto. El husillo realiza los movimientos gracias a la acción de varios motores, servomotores o encoder, caracterizados por proporcionar grandes potencias en bajas revoluciones. El encoder regula las revoluciones del motor deteniéndolo en el punto exacto que marca la programación, de ahí su gran precisión y versatilidad.
- Carrusel de herramientas : El carrusel de herramientas es una parte del centro de mecanizado CNC que ha marcado gran ahorro económico respecto a su semejante manual. El carrusel de herramientas es el almacén de las herramientas de la máquina, antes de comenzar una operación de mecanizado se deben seleccionar las herramientas necesarias para completar la operación. Una vez seleccionadas las herramientas se colocan en el carrusel de herramientas, cada vez que la máquina necesite cambiar de herramienta los tiempos de preparación se reducen considerablemente al situarlas en dicho almacén.

En la Figura 16 se observa un carrusel de herramientas de un centro de mecanizado.



Fig. 16. Carrusel de herramientas de un centro de mecanizado [28].

- Interfaz de usuario : La interfaz de usuario es el medio de comunicación que existe entre la máquina y el usuario. El usuario a través de este medio es el encargado de programar el trabajo de la máquina para obtener el resultado final, en la Figura 17 se muestra un ejemplo de la interfaz de usuario.



Fig. 17. Interfaz de usuario centro de mecanizado CNC [28].

- Subsistemas de extracción de viruta : Durante el proceso de mecanizado se crea una gran cantidad de viruta, los sistemas de extracción se encargan de recogerla y depositarla correctamente fuera de la máquina. Estos subsistemas añaden seguridad al proceso porque la viruta de algunos materiales es inflamable y pueden arder durante la operación de corte.

### 2.2.2 Tipos de operaciones de mecanizado.

Tras introducir los elementos básicos de la máquina-herramienta vamos a definir las principales operaciones que puede realizar. La mayoría de las operaciones de mecanizado realizadas por estas máquinas-herramientas acontecen en ámbitos

industriales. Estas máquinas son las encargadas del proceso de transformación de la pieza bruta a la pieza final.

Las diferentes operaciones realizadas dependen de dos factores, el primer factor es la elección de la herramienta a utilizar, el segundo factor depende del movimiento relativo entre la máquina-herramienta y la pieza de corte. Las operaciones de mecanizado más utilizadas son las siguientes:

- Taladrado y mandrinado. El taladrado y el mandrinado son las operaciones más comunes debido a que la mayoría de los productos concebibles necesitan taladros para su fabricación. El taladrado es la operación encargada de crear agujeros en un material, mientras que la operación de mandrinar (Figura 18) se caracteriza por aumentar el diámetro de los taladros existentes.



*Fig. 18. Operación de mandrinado [29].*

- Torneado. El torneado es una operación a través de la cual se crean superficies de revolución por arranque de viruta combinando los movimientos lineales de la herramienta y rotatorios de la pieza a mecanizar.

Las piezas realizadas por torneado presentan una buena calidad superficial, es una operación que presenta buena precisión.

La máquina que realiza estas operaciones se denomina torno, puede ser manual o automático, gobernado por un CNC. Existen diferentes modalidades de tornos entre los cuales destacan el torno paralelo, el torno frontal (Figura 19) y el torno vertical.



Fig. 19. Torno horizontal [29].

- Fresado. La operación de fresado es una operación de corte realizada con una herramienta rotativa de numerosos filos denominada plaquita. Esta operación destaca por su gran versatilidad, permitiendo casi cualquier movimiento en la dirección de los tres ejes en la que tiene el movimiento permitido la mesa de anclaje. La Figura 20 muestra una operación de arranque de viruta mediante una operación de fresado



Fig. 20. Operación de fresado [29].

Las operaciones de fresado se han convertido en las más flexibles, permitiendo un gran número de operaciones. Las operaciones más utilizadas en la industria son el aplanamiento ( como su nombre indica se utiliza para aplanar las superficies de los materiales), el fresado en escuadra ( permite realizar escalones perpendiculares a la superficie de la pieza), el cubicaje, ranurados de diferentes tipos ( recto, de forma, de chavetero...) , el copiado, corte... Para la realización de cada una de estas operaciones existe una herramienta o fresa específica, como se puede observar en Anexo 1.

### 2.2.3 Principios básicos sobre el mecanizado.

En este apartado se van a presentar principios básicos del mecanizado como los parámetros de corte de una operación de mecanizado, las características del corte de alta velocidad, la tipología de corte ortogonal, los movimientos realizados durante el proceso de mecanizado y la importancia de la viruta.

#### *Mecanizado de Alta Velocidad [26] .*

El mecanizado de alta velocidad (MAV) se define como la optimización del proceso mecanizado de diferentes materiales mediante el aumento de la velocidad de corte, con la limitación propia del material y de la herramienta. Gracias a este tipo de mecanizado se pueden obtener velocidades de corte considerablemente mayores respecto a los métodos tradicionales, entre 5 y 10 veces dependiendo del material. En la Figura 21 se pueden observar las velocidades de corte convencional y de MAV de diferentes materiales.

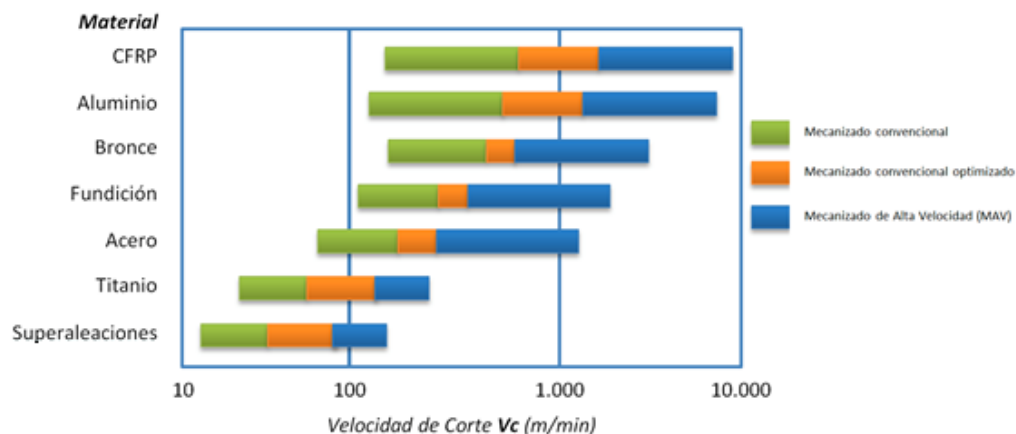


Fig. 21. Comparación Vc del mecanizado convencional y MAV [26] .

Las principales diferencias entre un mecanizado convencional y un mecanizado de alta velocidad se ven reflejadas en la variación de los parámetros de corte. Las pasadas de gran profundidad a bajas velocidades de corte propias del mecanizado convencional se convierten en pasadas mucho más rápidas con una profundidad de corte menor que provocan un aumento del volumen de viruta desalojada. Al realizar pasadas de menor profundidad la viruta creada posee un menor espesor, esto provoca una disminución de las fuerzas de corte.

Para alcanzar las velocidades requeridas en un mecanizado de alta velocidad se deben disponer de herramientas, portaherramientas y sistemas de refrigeración adecuados a las condiciones de la operación. La refrigeración es un punto importante ya que evita que la herramienta se fragilice y se desgaste.

El concepto de MAV nació con una patente de Carl Salomon en la cual mencionaba que existía una velocidad crítica en cada material a partir de la cual la temperatura de formación de viruta disminuía [30].

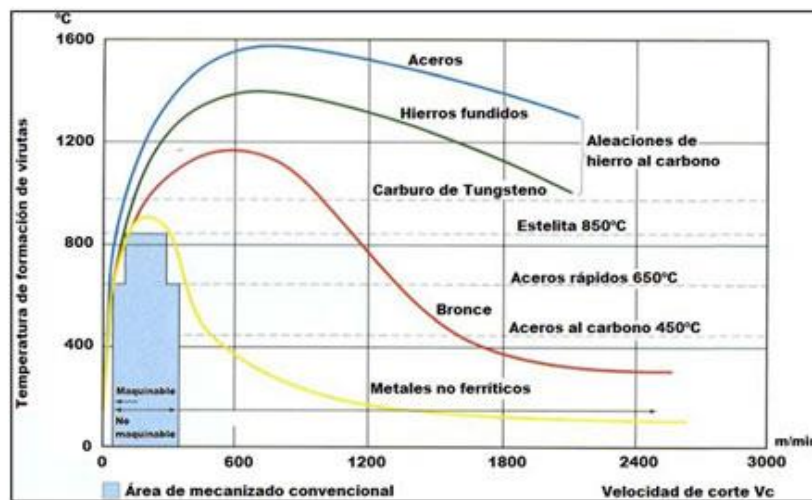


Fig. 22. Gráfica: Evolución de la temperatura de formación de viruta Vs. Vc en diferentes metales[30].

La principal ventaja del mecanizado a alta velocidad es la tendencia a la estabilización de la temperatura de la viruta en altas velocidades de corte. Como se puede observar en la Figura 22, la temperatura sufre un descenso menos pronunciado en materiales como los aceros y las fundiciones, mejorando notablemente en metales no ferríticos.

Otras ventajas destacables son la reducción de costes y tiempos de mecanizado, la gran evacuación de calor por medio de la viruta, la mecanización de aceros duros, aumento de precisión y acabado superficial.

#### *Movimientos relativos al proceso de mecanizado y parámetros de corte.*

Las operaciones de mecanizado se basan en la interacción de una herramienta con la pieza a mecanizar. Durante la interacción se producen movimientos relativos entre



ambos objetos, a continuación, se van a definir los *movimientos existentes* en la operación de mecanizado:

- *Movimiento de aproximación* : El movimiento de aproximación es el primer y último movimiento realizado por la herramienta, consiste en la aproximación a la pieza de mecanizado para comenzar la operación, también se utiliza cuando se cambia la zona de trabajo dentro de la misma pieza. Estos movimientos suelen ser bastante rápidos debido a que no hay contacto con la pieza, al aproximarse a la velocidad disminuye y empieza la operación programada.
- *Movimiento de corte* : El movimiento de corte es el movimiento principal de la herramienta, el responsable de la eliminación del material. Los principales movimientos de corte suelen ser circulares o rectos, pero sin movimiento de avance.
- *Movimiento de avance* : El movimiento de avance es el que permite al movimiento de corte un arranque continuo de viruta, marcando la trayectoria que debe seguir la herramienta en todo momento.
- *Movimiento de profundidad o penetración* : Como su nombre indica es el encargado de aportar profundidad al corte, este movimiento es el encargado de regular el grosor de la viruta.

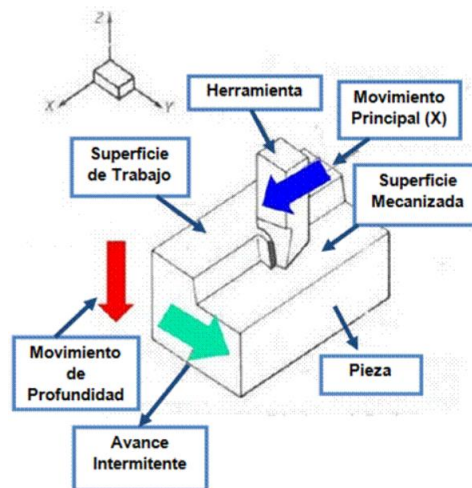


Fig. 23. Principales movimientos de la herramienta respecto a la pieza [31].

En la Figura 23 se pueden observar los movimientos de corte, penetración y avance. El movimiento de corte en este ejemplo es rectilíneo, por lo tanto, se encarga de arrancar el material en una carrera. El movimiento de avance es el encargado de mover



la herramienta en el eje Y una vez la carrera ha finalizado para que el arranque de viruta pueda continuar, mientras el movimiento de penetración se produce en el eje Z determinado la profundidad del corte.

A continuación, se van a definir los parámetros de corte relacionados con los movimientos definidos anteriormente, principalmente existe una variable relacionada con cada movimiento mencionado:

- Velocidad de corte ( $V_c$ ) : La velocidad de corte es la velocidad tangencial de un punto aleatorio perteneciente a la zona perimetral de herramienta. La dirección y sentido de la velocidad es la misma que la velocidad de corte, generalmente las unidades de medida son m/min. Para obtener el valor numérico de la velocidad de corte es necesario conocer el diámetro de la herramienta o la pieza ( si se trata de un torno) y la velocidad de la herramienta en revoluciones por minuto, la Figura 24 muestra los principales parámetros de la velocidad de corte.

$V_c$  se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$V_c = \frac{n \cdot d \cdot \pi}{1000} \quad [\text{Ec. 2}]$$

Donde :

$V_c$  : Velocidad de corte [m/min]

$d$  : Diámetro de la herramienta o de la pieza [mm]

$n$  : Velocidad de la herramienta [Rev./min]

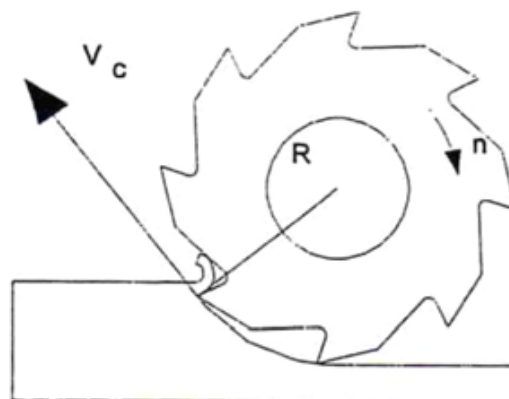


Fig. 24. Esquema de los parámetros utilizados para el cálculo de  $V_c$  [32].

- Velocidad de avance ( $V_a$ ) : La velocidad de avance se calcula relacionando el avance y la velocidad de la herramienta. Se entiende como avance el desplazamiento que sufre la herramienta en cada carrera o revolución. En primer lugar, se va a calcular el avance de mecanización ( $F_n$ ) que permite obtener la velocidad de avance.

El avance se define como la velocidad lineal de la herramienta, se calcula a partir del número de dientes y el avance por diente ( distancia recorrida en el sentido de la herramienta durante el tiempo en el cual un diente realiza una vuelta completa, Figura 25), mediante la siguiente ecuación:

$$F_n = F_z \cdot Z \quad [\text{Ec. 3}]$$

Donde:

- $F_n$  : Avance de la herramienta [mm/Rev.]
- $F_z$  : Avance por diente [mm/ Rev. diente]
- $Z$  : Número de dientes [diente]

Una vez obtenido el avance de la herramienta se puede obtener la velocidad de avance:

$$V_a = F_n \cdot n \quad [\text{Ec. 4}]$$

Donde:

- $V_a$  : Velocidad de avance [mm/Rev.]
- $n$  : Velocidad de rotación de la herramienta [Rev./min]

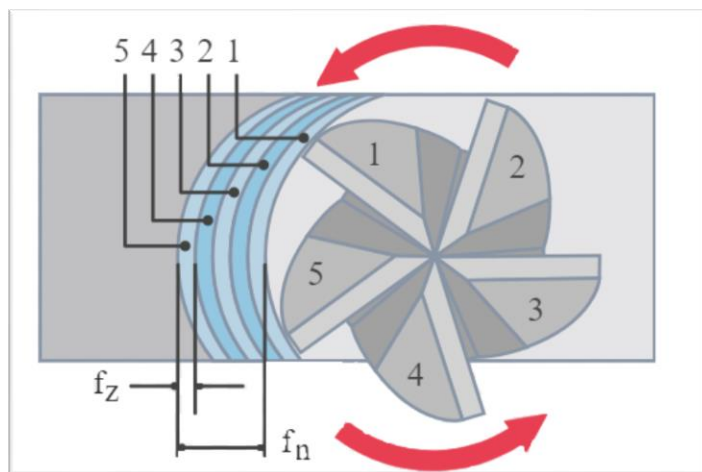


Fig. 25. Representación variable  $V_a$ .

- Profundidad de corte ( $p$ ) : Como su nombre indica, es la profundidad a la que penetra la herramienta y determina el espesor de la viruta.

Conociendo los datos de profundidad de corte y el avance se puede calcular la sección de la viruta mediante la siguiente fórmula:

$$S = F_n \cdot p \quad [\text{Ec. 5}]$$

Donde la sección de la viruta se representa con la letra S y se mide en  $[\text{mm}^2]$ .

### *Mecanizado de Corte ortogonal.*

Las operaciones de corte se pueden clasificar según el tipo de corte realizado, existiendo dos tipologías: corte oblicuo u ortogonal. La diferencia principal entre ambos tipos de cortes es el ángulo de inclinación existente en cada uno de ellos, este ángulo está formado por la dirección perpendicular de avance de la pieza y el filo de la herramienta.

En la Figura 26 se observa como el corte ortogonal, situado en la parte izquierda de la figura, tienen un ángulo de inclinación cero al coincidir el filo de corte con la dirección perpendicular de la herramienta. Por el contrario, en la parte derecha de la imagen se puede observar una pieza mecanizada con corte oblicuo, observando claramente que el ángulo de inclinación no es nulo [33].

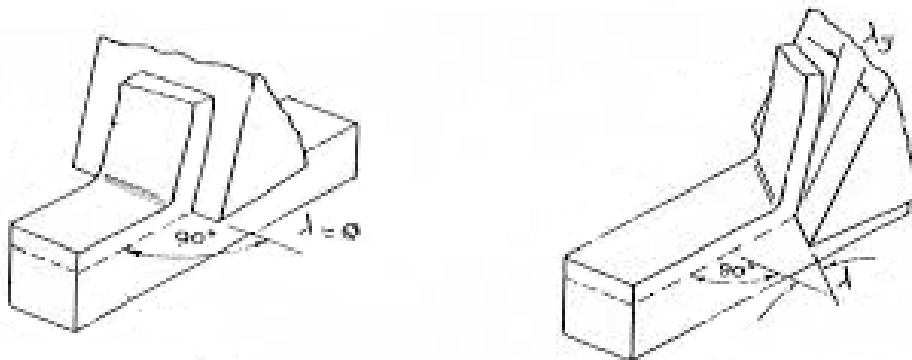


Fig. 26. Comparación entre el corte ortogonal y el corte oblicuo [33].

El corte ortogonal es el modelo más utilizado a la hora de realizar simulaciones. La utilización de este modelo se debe a su menor complejidad a la hora de calcular los parámetros de corte, resultando muy semejantes a los resultados reales. A continuación, se van a explicar las características más significativas de este modelo de corte [34]:

## Ángulos.

En el proceso de corte ortogonal los ángulos vienen definidos por las partes más importantes de la herramienta: la superficie de desprendimiento, la superficie de incidencia y el filo de la herramienta. La elección de los ángulos a utilizar viene determinada por la herramienta utilizada para la operación de corte y el material sobre el cual se está trabajando. En la Figura 27, se pueden observar las partes mencionadas anteriormente y sus respectivos ángulos.

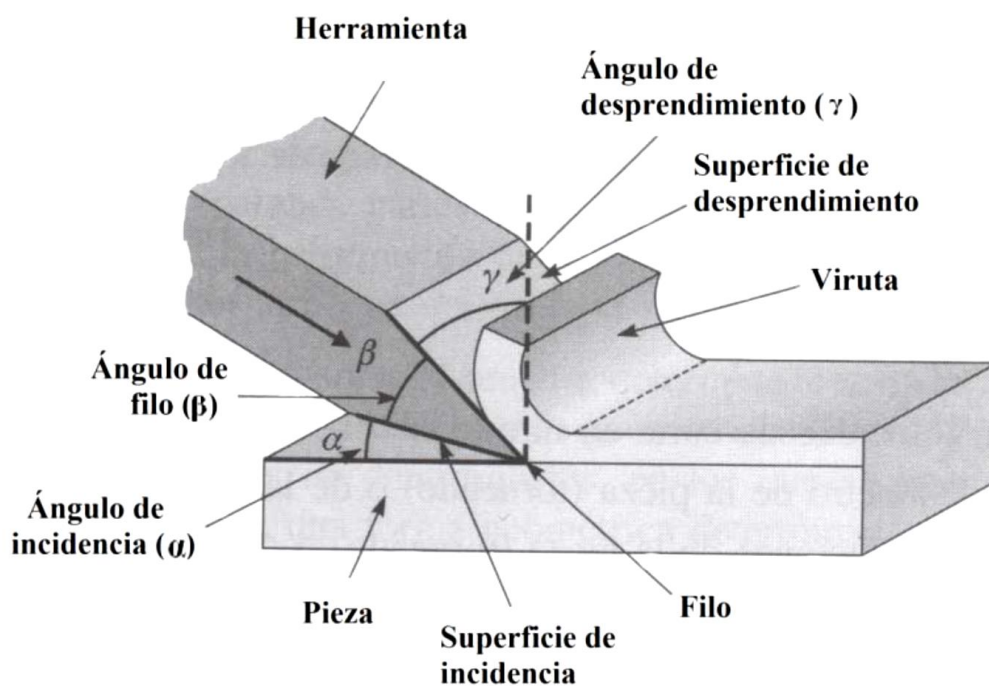


Fig. 27. Ángulos característicos del corte ortogonal [35].

- Ángulo de desprendimiento ( $\gamma$ ) : Como se ha podido observar en la imagen anterior el ángulo de desprendimiento está formado por la superficie de desprendimiento y el plano ortogonal a la velocidad de corte que contiene al filo de la herramienta. Este ángulo tiene gran incidencia tanto en la facilidad de corte de la herramienta como en la resistencia de esta.

Si el ángulo de desprendimiento de alto la herramienta se debilitará, pero podrá realizar el corte en pieza con la menor resistencia posible. Por el contrario, si el

ángulo es pequeño la herramienta tendrá que ejercer un gran esfuerzo para realizar el corte y la herramienta será más resistente.

- Ángulo de incidencia ( $\alpha$ ) : El ángulo de incidencia está formado por la superficie de incidencia y plano formado por la dirección de la velocidad de corte y el filo de la herramienta. La variación de este ángulo influye sobre el desgaste y la resistencia del filo de la herramienta.

Si el ángulo es muy pequeño existirá una gran zona de contacto entre la pieza y la superficie de incidencia, provocando un desgaste excesivo de la herramienta a causa del roce.

Por el contrario, si el ángulo es demasiado elevado el filo se debilitará, pero el desgaste se evita.

- Ángulo de filo ( $\beta$ ) : El ángulo de filo es propio de la herramienta, está definido por el plano de la superficie de incidencia y el plano de la superficie de desprendimiento.
- Ángulo de cizallado ( $\Phi$ ) : El ángulo de cizallado está definido por el plano de cizallado y el plano formado por la dirección de velocidad de corte y el filo de la herramienta. El ángulo de cizallado determina el lugar del plano de cizallado, todo el material que se encuentra por debajo de este plano no sufrirá deformaciones.

### Velocidades.

Las velocidades características del mecanizado ortogonal son, la velocidad de corte ( $V_C$ ), la velocidad de la viruta con relación a la herramienta ( $V_V$ ) y la velocidad de cizallamiento o de deformación ( $V_S$ ), es la velocidad de rotura de la viruta. La velocidad de corte se ha definido anteriormente junto con los parámetros de mecanizado, a continuación, se van a definir y a calcular las otras dos velocidades.

La Figura 28 muestra la composición de las fuerzas implicadas en la operación de corte ortogonal:

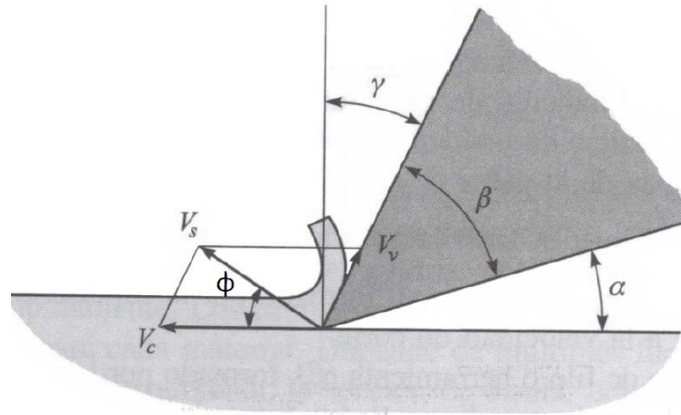


Fig. 28. Velocidades características del mecanizado ortogonal [21].

Para realizar el cálculo de las velocidades anteriores se necesitan conocer los valores del ángulo de cizalladura ( $\Phi$ ) y el factor de recalcado  $C_r$ , para poder obtener el ángulo de desprendimiento ( $\gamma$ ).

$$C_r = \frac{t_c}{t_0} \quad [\text{Ec. 6}]$$

$$\tan \Phi = \frac{\cos \gamma}{C_r - \sin \gamma} \quad [\text{Ec. 7}]$$

Donde:

- $t_c$  : Espesor de la viruta.
- $t_0$  : Profundidad de corte

Una vez obtenido el valor del ángulo de desprendimiento se pueden calcular las velocidades  $V_s$  y  $V_v$ , mediante las siguientes fórmulas:

Velocidad de cizallamiento:

$$V_s = V_c \frac{\sin \left( \frac{\pi}{2} - \gamma \right)}{\sin \left( \gamma + \frac{\pi}{2} + \Phi \right)} \quad [\text{Ec. 8}]$$

Velocidad de la viruta:

$$V_v = V_c \frac{\sin \Phi}{\sin \left( \gamma + \frac{\pi}{2} + \Phi \right)} \quad [\text{Ec. 9}]$$

## Fuerzas.

Tanto para obtener el valor de la potencia requerida para la realización de la operación, como para calcular las licitaciones dinámicas a las que se somete la herramienta, es necesario la obtención de las fuerzas de corte en el mecanizado. El punto donde reaccionan las fuerzas está directamente relacionado con el valor del ángulo de desprendimiento, cuanto mayor sea el ángulo más cerca del filo se encontrarán las fuerzas de reacción.

### Diagrama de círculo de fuerzas

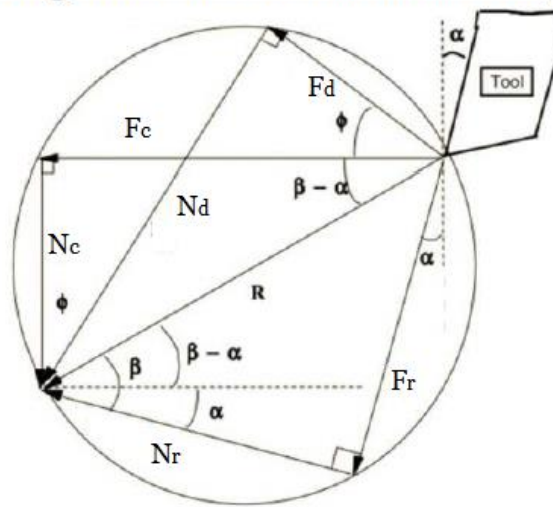


Fig. 29. Representación de las fuerzas mediante el círculo de Merchant [31].

Como observamos en la Figura 29 la fuerza aplicada sobre la pieza se descompone en tres:

- Fuerza de corte,  $F_c$ .
- Fuerza de deslizamiento,  $F_d$ .
- Fuerza de rozamiento Herramienta-Viruta,  $F_r$ .

Analizando la Figura 30, se obtiene vectorialmente:

$$R = F_r + N_r = F_d + N_d = F_c + N_c \quad [\text{Ec. 10}]$$

Donde:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_c = R \cos (\rho - \gamma) \\ N_c = R \operatorname{sen} (\rho - \gamma) \\ F_d = R \cos (\Phi + \rho - \gamma) \\ N_d = R \operatorname{sen} (\Phi + \rho - \gamma) \\ F_r = R \operatorname{sen} \rho \\ N_r = R \cos \rho \end{array} \right.$$

Una vez obtenidos los valores anteriores calcularemos el coeficiente de rozamiento Herramienta-Viruta:

$$\mu = \frac{F_r}{N_r} = \frac{\operatorname{sen} \rho}{\cos \rho} = \tan \rho \quad [\text{Ec. 11}]$$

#### 2.2.4 Viruta en el mecanizado.

La viruta se origina a causa de operaciones de desbaste y acabado, en un proceso de mecanizado por arranque de viruta es obvio que se transforma el material arrancando partes de este mediante este tipo de operaciones. La formación de viruta sucede a causa de deformaciones elásticas producidas por la herramienta sobre el metal, convirtiéndose en viruta.

La viruta adquiere propiedades diferentes a las del material de origen entre las cuales destacan las siguientes: El cambio color experimentado por la viruta al desprenderse del material primitivo y adquisición de una dureza y fragilidad. También hay que mencionar que la viruta está formada por dos superficies o caras, la cara de ataque (superficie en contacto con la herramienta) y la superficie original de la pieza.

La morfología de la viruta está directamente relacionada con el tipo de material mecanizado y los parámetros de corte aplicados en la operación. Principalmente se pueden clasificar en tres grupos, viruta continua, viruta discontinua y viruta segmentada, aunque se presentan estados intermedios. Hay que puntualizar que cuanto más segmentada se encuentre la viruta menos esfuerzo provocará su evacuación o eliminación.



### Morfología de la viruta. [36] [37]

En este apartado se van a definir las diferentes morfologías de la viruta mencionadas anteriormente:

- Viruta continua : La viruta continua es característica de materiales dúctiles mecanizados con elevados ángulos de ataque o velocidades muy elevadas. La viruta se forma gracias a la deformación del material a lo largo de una pequeña zona de cizalladura, también es importante para evitar la rotura de la propia viruta que exista el mínimo rozamiento entre la herramienta.

Las principales propiedades que causan en el metal mecanizado son las siguientes, provocan un acabado superficial de gran calidad, tras el desprendimiento de la viruta el material aumenta su dureza y disminuye su ductilidad. Además, para la formación de esta tipología de viruta se necesitan unas fuerzas de corte estables.

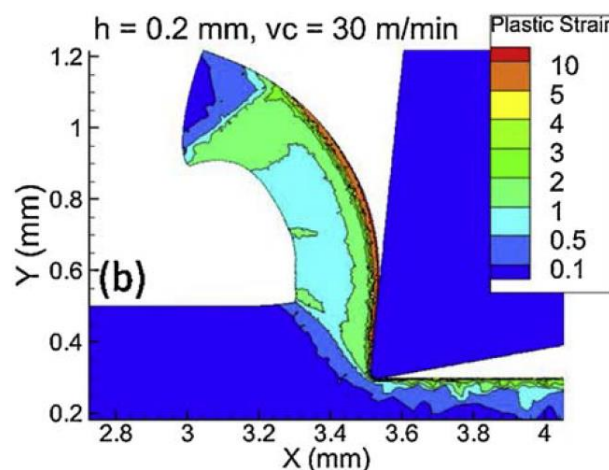


Fig. 30. Ejemplo de formación de viruta continua en una simulación de corte ortogonal [3].

La viruta continua presenta una serie de inconvenientes que hay que tener en cuenta, pues podría causar efectos no deseados en el proceso. Especialmente en máquinas CNC, la viruta continua es un elemento a evitar debido a que su formación continuada puede provocar enredos en el portaherramientas, los soportes y en la propia pieza. También puede averiar los sistemas de evacuación de viruta, anulando su uso. La Figura 30 muestra la formación de viruta continua mediante una simulación de mecanizado ortogonal.

Para evitar estos problemas habría que complementar la máquina con elemento rompevirutas, evitando los problemas mencionados anteriormente.

Dentro de la formación de viruta continua existen diferentes variantes entre las que destacan:

La viruta continua con borde, caracterizada por la adhesión de pequeñas partículas de viruta sobre la herramienta. Este problema puede estar causado por numerosas causas, por ejemplo, elevadas temperaturas, bajas velocidades de corte, uniones metálicas etc. Dentro de este tipo de viruta los bordes pueden ser lisos o irregulares.

- Viruta discontinua : Este tipo de viruta es propia de materiales frágiles o con impurezas, suele presentarse cuando se realizan mecanizados con una profundidad de corte elevada y velocidades de corte muy elevadas o, por el contrario, muy bajas. En la Figura 31 se puede observar el aspecto que presenta la viruta discontinua.

El acabado superficial en los materiales frágiles, a causa del filo de las herramientas utilizado, suele ser bastante bueno. En cambio, el acabado superficial en materiales dúctiles no es el deseado, provoca superficies rugosas.

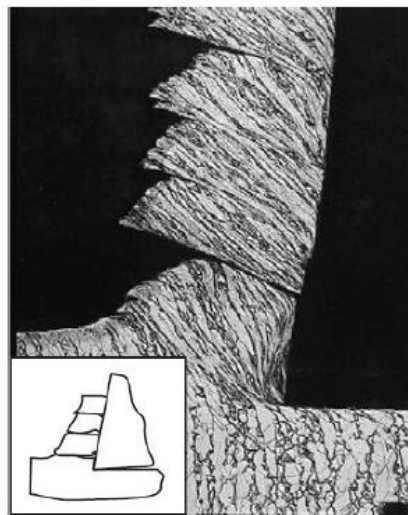


Fig. 31. Imagen de la morfología de viruta discontinua [38].

- Viruta segmentada : Esta tipología de viruta es propia de metales con una resistencia que disminuye rápidamente con la temperatura, y de metales con conductividad térmica, como el titanio. La viruta obtenida es semicontinua, caracterizada por poseer

zonas de alta o baja deformación por cortante. Como se observa en la Figura 33, la viruta tiene una forma serrada por la parte exterior.



*Fig. 32. Viruta segmentada observada con un microscopio [4].*

### 2.3 Simulación mediante método de elementos finitos y modelo Johnson-Cook.

Para la realización de simulaciones de un proceso de mecanizado hay que asemejar el comportamiento del material con algún modelo de materiales. Los modelos de materiales aplicables en nuestro proyecto son aquellos que describen el comportamiento de los metales que experimentan deformaciones plásticas.

La aplicación de un modelo correcto es de gran importancia, debido a que de él depende la autenticidad de los resultados obtenidos. Por lo tanto, hay que elegir un modelo cuyas ecuaciones constitutivas se asemejen lo máximo posible al comportamiento descrito por nuestro material durante su etapa elástica y plástica.

#### 2.3.1 Modelo Johnson-Cook [39]

El modelo Johnson-Cook es el modelo constitutivo más utilizado y más atractivo entre los modelos conocidos que definen la deformación plástica de un material. Este modelo es puramente empírico, tiene en cuenta la variación de temperatura, las condiciones de plasticidad y elasticidad, así como, la resistencia estática y cinemática del material.

El modelo queda representado de la siguiente forma:

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = (A + B\varepsilon^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_f - T_0}\right)^m\right) \quad [\text{Ec. 12}]$$

Donde:

- $\varepsilon$  : Deformación plástica .
- $\dot{\varepsilon}$  : Velocidad de deformación plástica.
- $\dot{\varepsilon}_0$  : Velocidad de deformación plástica de referencia.
- $T_f$ : Temperatura de fusión del material.
- $T_0$ : Temperatura ambiente.
- $A$  : Límite elástico a temperatura ambiente, baja velocidad de deformación.
- $B$  y  $n$  : Endurecimiento por deformación.
- $C$  : Sensibilidad del material a la velocidad de deformación.
- $m$  : Sensibilidad del material a la temperatura.

En la Figura 33, se observa la influencia que tienen las variables de Johnson-Cook sobre la tensión.

Se puede observar en el medio la ley de endurecimiento por deformación del material. Por encima y por debajo, se observa la variación los valores de la tensión , incrementándolos o disminuyéndolos, en función de la velocidad de deformación plástica y de la temperatura.

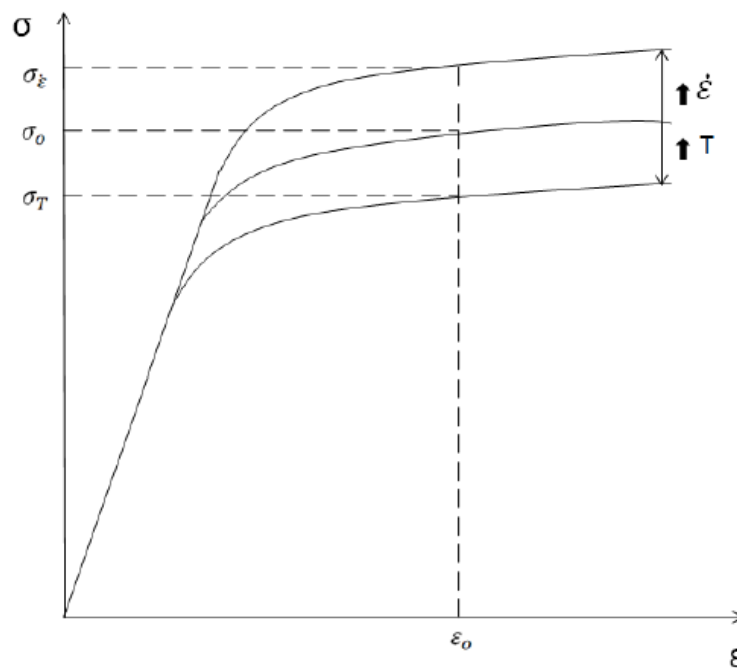


Fig. 33. Variación de la tensión en función de la velocidad de deformación y la temperatura [40].

### 2.3.2 Método de elementos finitos.

El método de elementos finitos, a partir de ahora MEF, es un método numérico creado para la resolución de ecuaciones diferenciales. Dicho método está especialmente diseñado para resolverse mediante la ayuda de softwares, aunque también se puede resolver sin necesidad de ellos si el problema no es muy complejo.

El MEF, y su utilización en la industria, ha provocado un gran ahorro económico y de tiempo. Antes de la utilización de este método era inviable realizar cálculos numéricos del comportamiento de ciertos objetos, maquinas, materiales... por lo tanto, la única solución para realizar dichos cálculos era crear un prototipo del objeto en estudio para estudiar los comportamientos deseados. Aquí reside el auténtico ahorro económico, gracias al software que trabajan con MEF la necesidad de crear prototipos para observar los comportamientos de los materiales se ha reducido considerablemente. No hay que olvidar que los datos obtenidos mediante el MEF no son idénticos a los observados en el mundo real, pero proporcionan un comportamiento muy aproximado.

El MEF adquirió gran importancia a partir de los años 60, cuando las aplicaciones prácticas de elementos finitos crecieron en tamaño. El principal problema existente era que este método estaba destinado a utilizarse con potentes ordenadores, normalmente propiedad de las industrias aeronáuticas, automoción, nucleares y de defensa.

A partir de 1980 y con la entrada al mercado de los ordenadores personales el MEF se comienza a utilizar en programas comerciales y con un mayor abanico de especialidades, ampliando su uso a nuevos modelos de comportamiento y al análisis de errores. En la actualidad, el MEF dentro del ámbito estructural es el método más utilizado junto con el método matricial.

El MEF trabaja de la siguiente forma, se divide el objeto de estudios en un número determinado de nodos, estos nodos se unen obteniendo una malla. La simulación realizada mostrará una solución aproximada en la pieza y una solución exacta en cada nodo, por lo tanto, cuanto mayor sea el número de nodos mayor será la exactitud de la simulación. La realización de una simulación se puede dividir en tres sencillos pasos:

- *Etapas de pre-proceso*, en esta etapa se define la geometría de la pieza, se determinan los nodos necesarios y se crea la malla. Además, en esta etapa hay que

añadir las propiedades del material de estudio y el modelo de comportamiento de este.

- Etapa de cálculo, este paso es el resultado del paso anterior. Tras crear nuestro problema en la etapa de pre-proceso, ahora se resuelven el problema creando un sistema de ``n`` ecuaciones con ``n`` incógnitas.
- Etapa de postproceso, en esta etapa se evalúan los valores obtenidos mediante la simulación anterior aplicando, si es necesario, interpolaciones o errores de aproximación.

Para el presente proyecto se va a utilizar la herramienta ABAQUS/CAE para la realización de las simulaciones oportunas. El programa ABAQUS es un software que trabaja utilizando el método de los elementos finitos para la resolución de multitud de problemas estructurales estáticos ( lineales y no lineales), dinámicos , térmicos, piezoeléctricos...

Más concretamente, el software será utilizado para la resolución de simulaciones de un proceso de mecanizado ortogonal 2D de la aleación de titanio TI-6AL-4V.

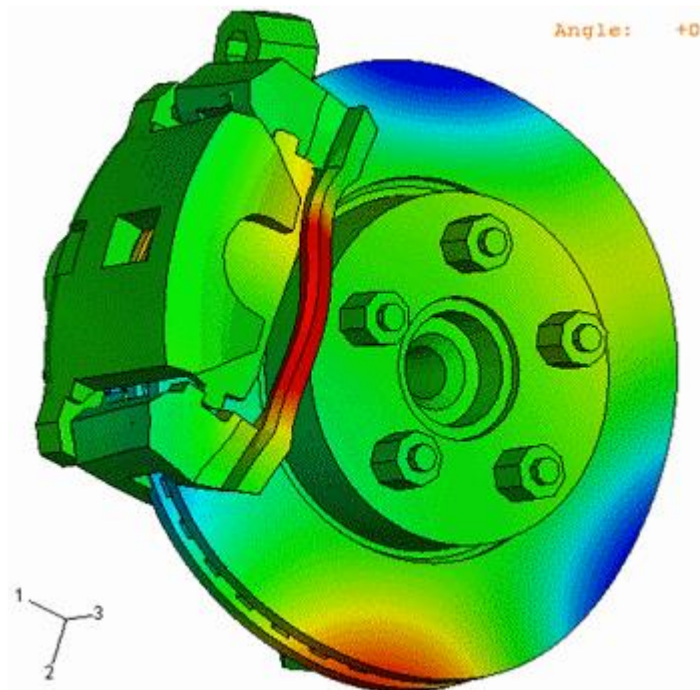


Fig. 34. Análisis del comportamiento de un freno de disco utilizando la herramienta ABAQUS [41].

## 2.4 Sinopsis del Ti-6Al-4V.

La función de este apartado es la de conclusión de la base teórica, entendiéndolo como la explicación de los conocimientos teóricos necesarios para el correcto entendimiento del proyecto realizado. Por lo tanto, se van a relacionar las propiedades intrínsecas del Ti-6Al-4V, explicadas en el apartado “El titanio y sus aleaciones”, con sus procesos de mecanizado.

Tabla 6. composición del Ti-6Al-4V.

<b>Elementos Químicos</b>	<b>C</b>	<b>Fe</b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>Al</b>	<b>V</b>	<b>Ti</b>
<i>Porcentaje en peso</i>	0.08	0.25	0.05	0.02	5.5-6.76	3.5-4.5	88.34-90.6

### 2.4.1 Estudio del mecanizado del Ti-6Al-4V [42].

Anteriormente se ha mencionado la gran importancia del titanio y de sus aleaciones en la industria actual, mencionando la mala maquinabilidad que poseen estos materiales [43]. Las principales causas de la dificultosa maquinabilidad de este material se pueden asociar a los siguientes factores:

- La escasa evacuación del calor del calor, debido a su alto calor específico y a su baja conductividad térmica, producida en las operaciones de mecanizado. Esta situación provoca elevadas temperaturas durante el proceso de mecanizado que perjudican gravemente a la herramienta, este desgaste se debe a la elevada reactividad química de la aleación, provocando la interacción del titanio con los materiales que forman la herramienta de corte. La reactividad química da lugar a procesos de difusión entre los materiales.

- El Ti-6Al-4V posee un módulo de Young bajo, que, unido a la elevada concentración de las fuerzas en la arista de la herramienta provoca un deterioro prematuro de la herramienta de trabajo. En el proceso de simulación del material se observará la evolución de las fuerzas de corte y avance en el proceso de mecanizado.



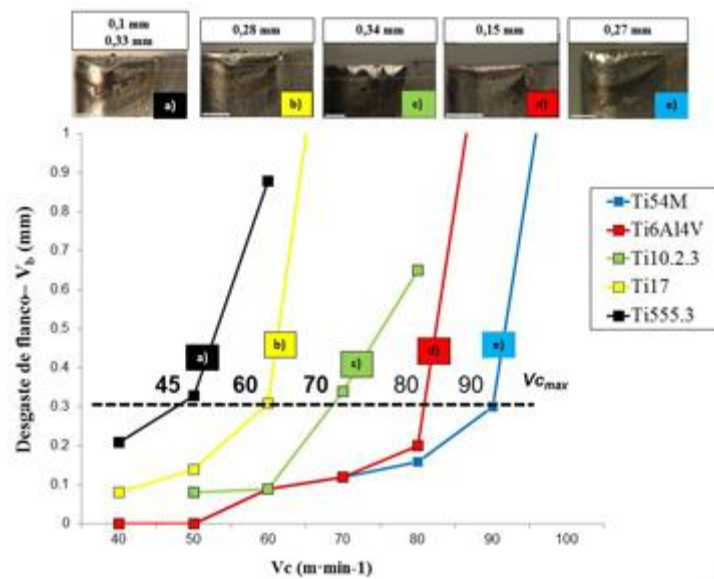


Fig. 35. Desgaste de la herramienta en diferentes aleaciones de titanio [26].

En la Figura 35 se muestra el desgaste de la herramienta en diferentes aleaciones del titanio. El gráfico representa el desgaste de la herramienta en función de la velocidad de corte, la línea discontinua muestra la velocidad máxima a la que se puede cortar el material antes de que se produzca un desgaste exponencial en la herramienta. La aleación Ti-6Al-4V, como confirma la gráfica, es una de las aleaciones de titanio que puede ser mecanizada a mayor velocidad de corte.

Por último, hay que destacar la formación de la viruta segmentada creada en la operación de corte, característica del metal que se explicará en el siguiente apartado. En la parte experimental se podrá comprobar la creación de la viruta en función de las velocidades de corte.

#### 2.4.2 Morfología de la viruta del Ti-6Al-4V.

La viruta formada, a partir del proceso de mecanizado, muestra una forma con dientes de sierra, por lo tanto, la viruta creada se define como viruta segmentada.

La formación de este tipo de viruta en la aleación del titanio es una ventaja como se ha observado en el apartado ``Morfología de la viruta``. Esta formación segmentada se debe a la baja difusividad térmica del material, característica que le permite formar bandas de



deformación en la viruta a bajas velocidades de corte. En la figura 36 se observan las bandas de cizalladura formadas en la viruta:

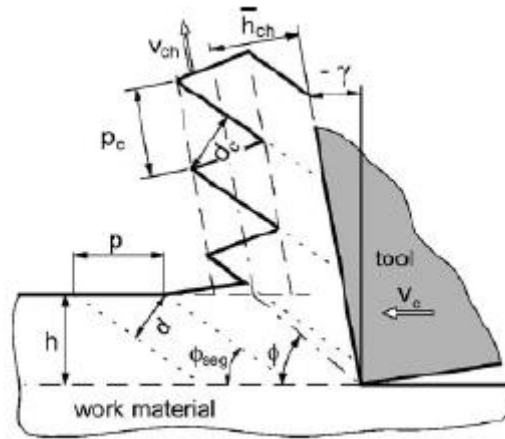


Fig. 36. Esquema de formación de viruta segmentada en operación de corte [2].

El desarrollo de la formación transcurre de la siguiente forma:

La máquina comienza la operación de corte, moviendo la herramienta contra el material, provocando cizalladura en el material. A causa de la baja conductividad térmica el calor no se transfiere al resto de la pieza.

La cizalladura continua en el material ablandándolo, como consecuencia de la transferencia de energía en el punto de cizalladura. En este contexto de ablandamiento del material la herramienta sigue su trayectoria causando un segmento de viruta y repitiendo el proceso nuevamente.

### 3. ABAQUS/CAE.

Para la ejecución del proyecto se ha simulado el proceso de mecanizado ortogonal del Ti-6Al-4V mediante el software ABAQUS/CAE. En esta sección del proyecto se van a mostrar los pasos realizados para modelizar el material y las herramientas de corte mediante ABAQUS.

#### 3.1 Introducción del software [41].

El software ABAQUS es un programa de cálculo de elementos finitos perteneciente al grupo SIMULIA (Figura 37). El programa ofrece una solución completa para el modelado, visualización y resolución de problemas mediante el desarrollo de elementos finitos.



Fig. 37. Logo del software Abaqus [41].

El programa integra diferentes módulos o subprogramas, accesibles mediante la obtención de la licencia específica, diferenciados entre sí según el uso o requerimiento necesario. Se pueden destacar los siguientes:

- Simulation Automation and Optimization: Módulo utilizado para la optimización de tiempos y modelos, la eliminación de cuellos de botella en algoritmos, reducir el uso de hardware...
- Abaqus Multiphysics: Módulo específico para la resolución de problemas multifísicos, un contexto muy habitual en los proyectos ingenieriles actuales. Este módulo se caracteriza por poseer una gran diversidad de herramientas para aportar soluciones en el mayor ámbito posible. Las principales herramientas que posee el módulo son las siguientes, Hydrostatic-Fluid-Mechanical (especializada en mecánica de fluidos), Piezoelectric-Mechanical, Structural-Acoustic, Thermal-Electric, Thermal-Mechanical...

Como se ha observado las herramientas propias del módulo abarcan ámbitos de la mecánica de fluidos, termodinámica, electricidad, acústica...

- *Abaqus Estándar/Explicit/Unified FEA*: Estos tres módulos son los encargados del estudio estructural, desde el estándar hasta la mayor gama. Este subprograma permite modelar, mallar, calcular y visualizar multitud de estudios relacionados con las estructuras de los materiales.

Los cálculos del presente proyecto han sido realizados mediante el módulo Abaqus/Explicit. Obteniendo un estudio completo del comportamiento del Ti-6Al-4V en una operación de corte ortogonal, permitiéndolo comparar con los valores obtenidos mediante procesos reales de mecanizado.

### 3.2 Metodología en ABAQUS específica para el mecanizado del Ti-6Al-4V.

A continuación, se va a analizar el proceso de simulación realizado para el mecanizado ortogonal del Ti-6Al-4V. Se mostrará la importancia de cada submódulo (a partir de ahora denominado módulo) en la modelización del material, desde el diseño de la pieza hasta la visualización de los resultados.

Para la realización del análisis del proceso se han dividido los módulos del programa en tres etapas.

#### 3.2.1 Etapa de pre-proceso.

La etapa de pre-proceso se define como la modelización del problema, concretando todos los detalles necesarios para asemejar lo máximo posible la simulación al proceso real. Para ello se diseñarán los elementos necesarios para la operación de mecanizado (herramienta y material a mecanizar), se definirán las propiedades de los materiales y se asignarán las condiciones de contorno requeridas. Todo ello va a ser explicado en sus módulos correspondientes:

##### *Módulo PART*

En este módulo se van a diseñar los elementos necesarios para realizar la simulación 2D de corte ortogonal, en este caso las herramientas y la pieza de trabajo.

Se han diseñado dos herramientas diferentes para realizar una comparación de ambas, herramienta tipo Wire y herramienta tipo Sólido. La herramienta tipo Sólido simula la

herramienta real, una herramienta completa y deformable, mientras que la herramienta tipo Wire es una simplificación de esta.

- Para realizar el diseño de la herramienta se selecciona el módulo PART, y posteriormente hay que seleccionar ``Create Part``. Tras seleccionar la función de crear parte se abre una pestaña donde se modeliza la herramienta, en el caso particular del presente proyecto es un material 2D tipo deformable/indeformable (herramienta tipo Sólido/Wire). Tras seleccionar las propiedades básicas del material se define su tamaño y forma, teniendo en cuenta parámetros de corte como el ángulo de incidencia,  $6^\circ$ , o el de desprendimiento,  $0^\circ$ , obteniendo la forma requerida como se puede observar la Figura 38 y Figura 39.

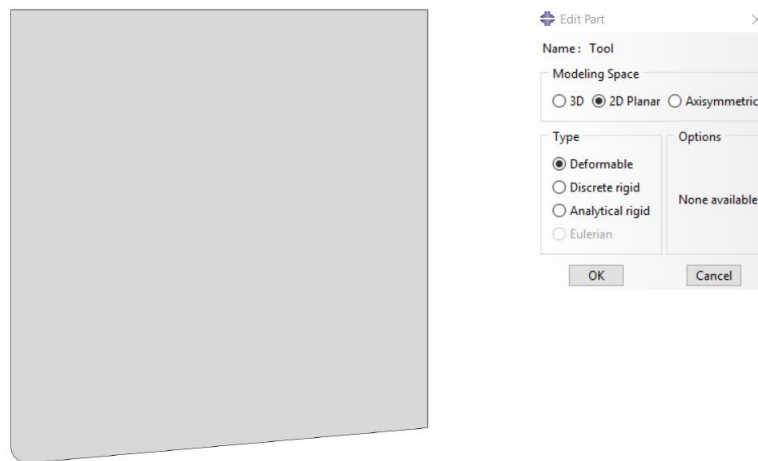


Fig. 38. Propiedades y diseño de la herramienta tipo Sólido.

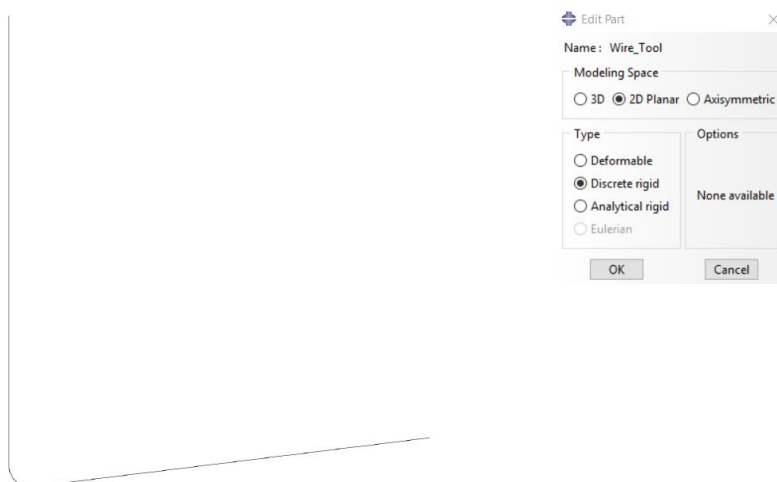


Fig. 39. Propiedades y diseño de la herramienta tipo Wire.

Las diferencias entre ambas herramientas residen en su influencia durante el proceso de simulación de corte. La herramienta tipo Wire al ser definida como ``Discrete rigid`` no va a sufrir el efecto de las fuerzas durante la operación de corte, esto implica que la herramienta no va a sufrir deformaciones ni aumentos de temperatura debido a la fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo. Por el contrario, la herramienta tipo Sólido se ha definido como deformable, a causa de esto interaccionará de una forma más intensa con la pieza de trabajo. La interacción producida entre la herramienta y la pieza de trabajo se puede puntualizar como una deformación y aumento de temperatura de la herramienta. Todos estos puntos se analizarán en el apartado de resultados del proyecto.

- Para la realización del diseño de la pieza de trabajo se siguen los mismos pasos que en el proceso anterior. Una vez que aparezca la pantalla de modelizado del material hay que indicar que se trata de un modelizado 2D deformable.

Para la asemejar el diseño a la realidad lo máximo posible se diferenciarán tres partes dentro de la pieza de trabajo, Chip, Layer y Base, como se puede observar en la Figura 40.

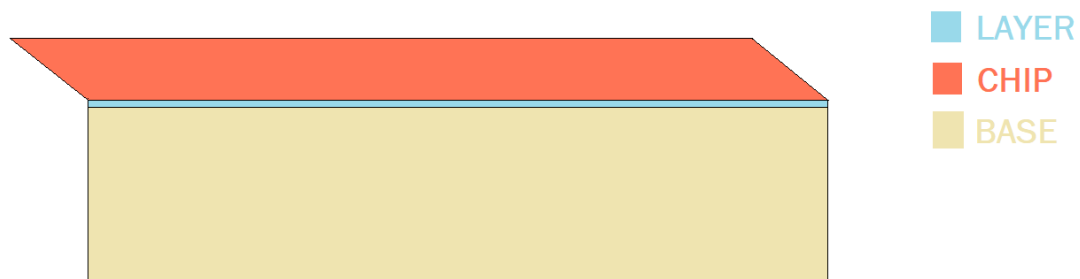


Fig. 40. Propiedades y diseño de la pieza de trabajo.

La división de la pieza de trabajo en tres partes diferenciable se realiza para indicar al programa el comportamiento de cada parte de la pieza:

El material que ocupa las posiciones Chip y Layer es el material desprendido durante de arranque de material que formará la viruta y su espesor es de 0.04 [mm].

Por último, se encuentra la zona Base cuyo espesor es 0.36 [mm] y es la parte mecanizada de la pieza.

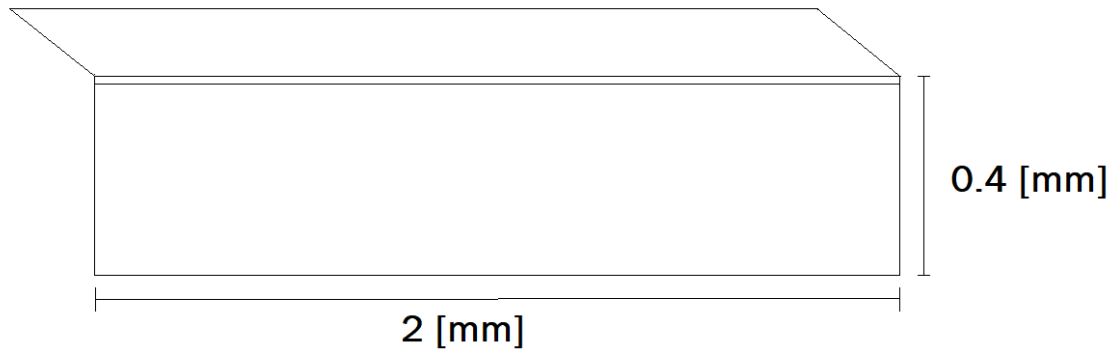


Fig. 41. Dimensiones de la pieza de trabajo.

Una vez realizado el diseño y modelado de las piezas de trabajo se procede a asignar las propiedades específicas de cada material, este proceso se realiza en el módulo ``Property``.

#### Módulo PROPERTY.

En este apartado se van a asignar las propiedades del material de la herramienta tipo Sólido y de las tres partes que constituyen la pieza de trabajo, Chip, Layer y Base. Para realizar este proceso hay que seleccionar cada una de las ``Parts`` por separado y crear un material para cada una.

En primer lugar, se creará el material correspondiente a la herramienta tipo Sólido. Para ello se selecciona la ``Part`` correspondiente a la herramienta Sólido y posteriormente se crea un material. Para la creación del material de la herramienta hay que determinar algunos conceptos como la densidad, la conductividad, el comportamiento durante la deformación elástica o el calor específico del mismo, en la Tabla 7 se definen estos parámetros:

Tabla 7. Propiedades de la herramienta tipo Sólido.

Propiedad	Herramienta tipo Sólido
<b>Conductividad [W/m·K]</b>	33.5
<b>Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b>	12700
<b>Comportamiento elástico</b>	$E = 5 \cdot 10^5$ [MPa] $\nu = 0.3$
<b>Calor específico [J/kg·°C]</b>	234

En segundo lugar, se asignará un material a la pieza de trabajo, pieza formada por la aleación de titanio Ti-6Al-4V. Para ello, en la pestaña ``Part`` se selecciona la pieza de trabajo diseñada anteriormente y, a continuación, se crea un material pulsando ``Create material``. Los parámetros para completar en el titanio son diferentes a los asignados en la herramienta de corte, la diferencia reside en el comportamiento del material durante la operación de mecanizado. Mientras que en la herramienta solo se ha definido la deformación elástica, en la pieza de titanio se define un modelo que simula el comportamiento del material a altas velocidades, el modelo de Johnson-Cook. A continuación, en la Tabla 8, se muestran las propiedades básicas del material:

Tabla 8. Propiedades de la pieza de trabajo Ti-6Al-4V.

Propiedad	Modelo con herramienta Sólido
<b>Conductividad [W/m·K]</b>	7.2
<b>Densidad [kg/m³]</b>	4420
<b>Comportamiento elástico</b>	$E = 1.14 \cdot 10^5$ [MPa] $\nu = 0.33$
<b>Calor específico [J/kg·°C]</b>	560
<b>Expansión</b>	$9.2 \cdot 10^{-6}$

El modelo de Johnson-Cook está definido en el programa, por lo tanto, solo es necesario introducir los valores de las variables que componen su ecuación. A continuación, se muestra nuevamente la ecuación :

$$\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) = (A + B\epsilon^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_f - T_0}\right)^m\right) \quad [\text{Ec. 13}]$$

Donde:

- $\epsilon$  : Deformación plástica .
- $\dot{\epsilon}$  : Velocidad de deformación plástica.
- $\dot{\epsilon}_0$ : Velocidad de deformación plástica de referencia.
- $T_f$ : Temperatura de fusión del material.
- $T_0$ : Temperatura ambiente.
- $A$  : Límite elástico a temperatura ambiente, baja velocidad de deformación.
- $B$  y  $n$  : Endurecimiento por deformación.
- $C$  : Sensibilidad del material a la velocidad de deformación.
- $m$  : Sensibilidad del material a la temperatura.

Los datos se han completado utilizando las propiedades conocidas del material y , mediante, las propiedades documentadas en libros de investigación sobre la simulación de alta velocidad de nuestro elemento de estudio [44] :

Tabla 9. Propiedades del Ti-6Al-4V aplicadas en el modelo Johnson-Cook.

A (MPa)	B (MPa)	n	C	$\dot{\epsilon}_0$ (1/s)	$T_f$ [K]	$T_0$ [K]	m
782	498	0.28	0.028	$10^{-5}$	1673	293	1

Por último, hay que especificar el valor de la energía de fractura del material. Este parámetro es uno de los que se ha variado en cada simulación para ver la influencia que provocaba en el material. En la Tabla 10 se observan los valores de este parámetro utilizados en las simulaciones:

Tabla 10. Valores de la energía de fractura utilizados en las simulaciones de corte del Ti-6Al-4V.

Energía de fractura [ J / m2]	
Modelo con herramienta tipo Wire	Modelo con herramienta tipo Sólido
25000	30000
30000	35000
35000	40000
40000	42000
45000	45000
50000	
55000	
60000	
65000	
70000	

### Módulos ASSEMBLY , INTERACTION y LOAD.

Una vez asignados todos los valores, el material está definido completamente. Los siguientes pasos de la etapa de pre-proceso hacen referencia al ensamblaje de las piezas creadas anteriormente , a la definición de las condiciones de contorno y a las interacciones entre los elementos del problema. El ensamblaje se realiza en el módulo ``ASSEMBLY`` y el resultado se puede observar en la Figura 42 :





Fig. 42. Ensamble de la pieza de trabajo con la herramienta tipo Wire.

Por último, hay que definir la interacción de las piezas diseñadas y aplicar las cargas necesarias para simular la operación de mecanizado.

La asignación de la interacción de los objetos creados se realiza en el módulo ``INTERACTION``, en la operación de corte, la interacción asignada ha sido la de la herramienta con la superficie superior de la pieza de trabajo .

El ultimo módulo de esta etapa es el denominado ``LOAD``, este módulo se caracteriza por definir las condiciones de contorno del problema. Para una realización correcta de la simulación hay que asignar una carga a la herramienta, para provocar su avance, y encastrar la pieza de trabajo. La pieza de trabajo es encastrada para evitar cualquier movimiento en cualquier eje, simulando la sujeción que se realizaría a la pieza antes de ser mecanizada, mientras que la carga aplicada a la herramienta hace la función de velocidad de avance.

Para la realización de las simulaciones se han utilizado diferentes velocidades de avance con cada herramienta y cada velocidad de fractura, específicamente las velocidades utilizadas han sido 0.5 m/s , 3 m/s y 15 m/s.

### 3.2.2 Etapa de cálculo.

En la etapa anterior se han realizado las operaciones necesarias para el modelizado de la herramienta y de la pieza de trabajo, asemejando el modelo virtual lo máximo posible a la realidad. En la etapa de cálculo se van a tratar los temas relacionados con el mallado y el simulado del ensamblaje creado, en sus módulos correspondientes en el programa.

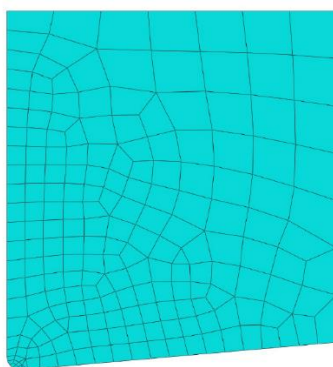
*Módulo ``MESH``*

El mallado del material es el componente más importante a la hora de realizar una simulación fiable, para ello, es importante realizar una malla con el máximo número de nodos posibles. El proceso de simulado funciona de la siguiente forma, el programa calcula la variación de los esfuerzos únicamente en los nodos de la malla, por lo tanto, cuanto mayor sea el número de nodos y más próximos estén entre sí, la solución aportada por el software será más homogénea y fiable. Una vez introducidos y distribuidos los nodos, el programa se encarga de unirlos entre sí formando la malla. A continuación, se va a analizar el mallado empleado en las diferentes piezas modelizadas:

- El mallado en la herramienta solo se ha realizado en la herramienta tipo Sólido, Figura 43, esto es debido a la ausencia de superficie en la herramienta tipo Wire. Para crear la malla en la herramienta tipo Sólido se ha utilizado 227 nodos, formando 201 elementos tipo CPE4RT y CPE3T. Los elementos creados se definen mediante el significado de las siglas que lo forman:

- 4 / 3 : Indica el número de nodos que forman el elemento.
- R : Elementos que tiene una interpolación en su centro.
- T : Elementos que contienen la temperatura como variable.

Para optimizar el tiempo de simulación se han concentrado un mayor número de nodos en la zona del filo de la herramienta y menos en el resto. En el filo se van a producir los principales cambios durante el proceso de mecanizado e interesa obtener resultados con la mayor homogeneización posible.



Total number of nodes: 227  
Total number of elements: 201  
195 linear quadrilateral elements of type CPE4RT.  
6 linear triangular elements of type CPE3T.

*Fig. 43. Imagen y características del mallado de la herramienta tipo Sólido.*

- El mallado en la pieza de trabajo, Figura 44, se ha realizado únicamente mediante elementos tipo CP34RT. La elección de los elementos se realiza en función de la

geometría de la pieza, en este caso, la geometría de la pieza es sencilla . Para crear la malla de la pieza de trabajo se ha utilizado 11295 nodos, formando 11000 elementos tipo CPE4RT.

Para optimizar el proceso de simulado se han concentrado un mayor número de nodos en la zona superior de la pieza de trabajo. En ese lugar se van a producir las principales deformaciones y el arranque de viruta durante el proceso de mecanizado. En definitiva, en estos puntos interesa obtener resultados con la mayor fiabilidad y homogeneidad posible.

Total number of nodes: 227

Total number of elements: 201

11000 linear quadrilateral elements of type CPE4RT

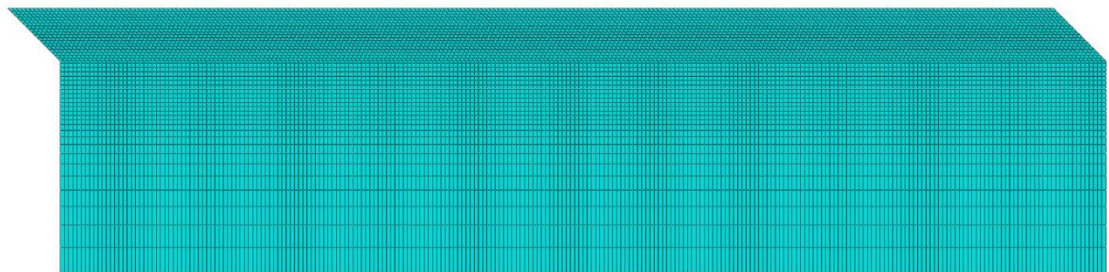


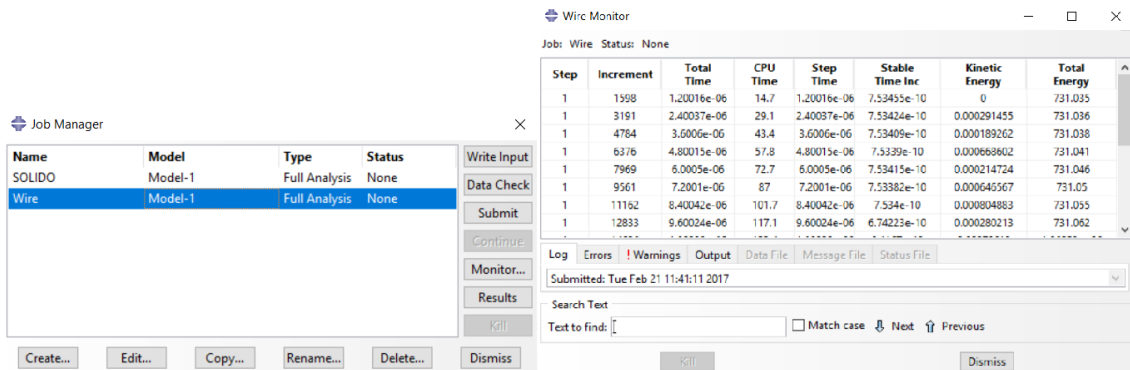
Fig. 44. Imagen y características del mallado de la pieza de trabajo.

### *Módulo ``JOB``*

El módulo ``JOB`` es el último proceso realizado en la etapa de cálculo. Tras la realización del diseño del material, la definición de sus propiedades, aplicación de las condiciones de contorno adecuadas, aplicación de las fuerzas necesarias para la correcta simulación del proceso y realización del mallado del material, el software tiene todos los datos necesarios para realizar una simulación con resultados verosímiles con la realidad.

El módulo ``JOB`` es el encargado de realizar la simulación del modelo creado, su funcionamiento es sencillo. Hay que crear un ``job``, modelándolo con las propiedades determinadas anteriormente, y posteriormente, se realiza su simulación. En la Figura 45, se aprecia como el programa, durante la simulación, calcula las propiedades del conjunto en pequeños incrementos de tiempo, del orden de  $10^{-6}$  [s]. Esta acción permite la

obtención de un gran volumen de datos, por lo tanto, se obtiene una evolución fiable del comportamiento de la pieza de trabajo durante todo el proceso de simulado :



**Job Manager**

Name	Model	Type	Status
SOLIDO	Model-1	Full Analysis	None
Wire	Model-1	Full Analysis	None

**Wirc Monitor**

Job: Wire Status: None

Step	Increment	Total Time	CPU Time	Step Time	Stable Time Inc	Kinetic Energy	Total Energy
1	1598	1.20016e-06	14.7	1.20016e-06	7.53455e-10	0	731.035
1	3191	2.40037e-06	29.1	2.40037e-06	7.53424e-10	0.000291455	731.036
1	4784	3.6006e-06	43.4	3.6006e-06	7.53405e-10	0.000189262	731.038
1	6376	4.80015e-06	57.8	4.80015e-06	7.5339e-10	0.000668602	731.041
1	7969	6.0005e-06	72.7	6.0005e-06	7.53415e-10	0.000214724	731.046
1	9561	7.2001e-06	87	7.2001e-06	7.53382e-10	0.000645567	731.05
1	11162	8.40042e-06	101.7	8.40042e-06	7.534e-10	0.000804883	731.055
1	12833	9.60024e-06	117.1	9.60024e-06	6.74223e-10	0.000280213	731.062

Fig. 45. Datos mostrados por el monitor durante la simulación del modelo.

En el caso del presente proyecto las simulaciones realizadas tardaban en completarse entre 5 minutos y 5 horas, dependiendo de la herramienta, velocidad de avance y energía de fractura asignadas en cada simulación.

### 3.2.3 Etapa de postproceso.

#### Módulo ``VISUALIZATION``

La etapa de postproceso coincide con el módulo ``VISUALIZATION``, la función de este módulo es la de visualizar los resultados de las simulaciones realizadas. Este módulo permite realizar visualizaciones de diferentes parámetros de los resultados de la simulación.

En nuestro caso particular se van a tener en cuenta tres variables:

- La evolución de la temperatura en la pieza de trabajo y en las herramientas: Para observar los efectos de esta variable hay que tener en cuenta la herramienta utilizada. La importancia de la elección de la herramienta reside en la transferencia de calor herramienta-pieza. La herramienta tipo Wire no absorbe temperatura durante el proceso de mecanizado, por lo tanto, la pieza de trabajo alcanzará temperaturas mayores.

Por lo contrario, la herramienta tipo Sólido absorbe parte del calor producido durante la operación de corte. En la Figura 46 se puede observar cómo evoluciona la temperatura de la herramienta durante el proceso de corte:

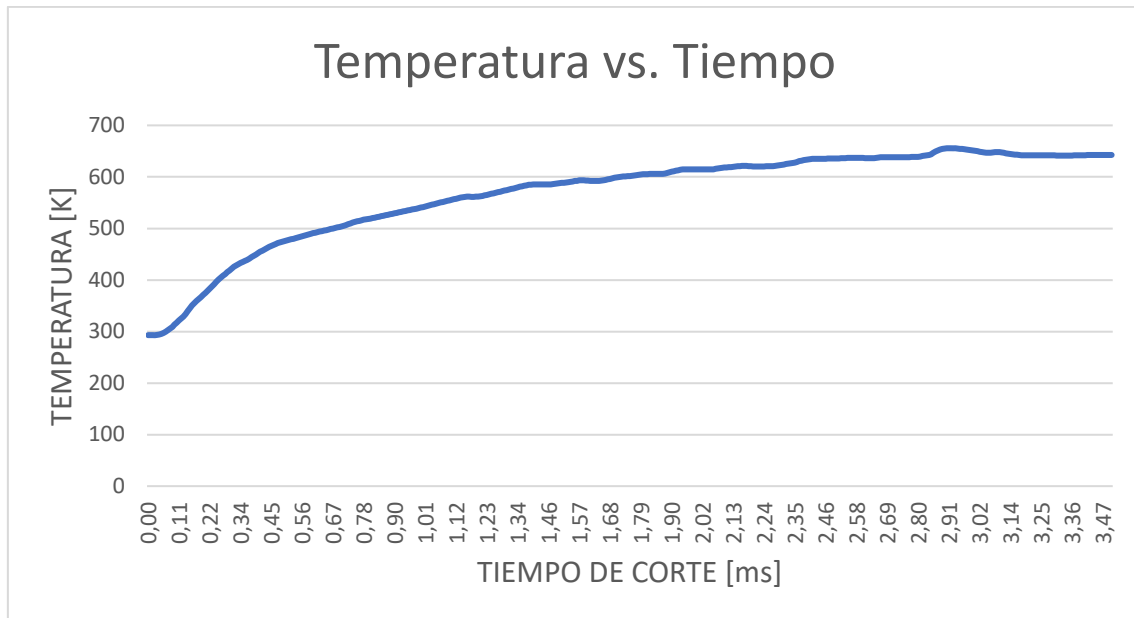


Fig. 46. Evolución de la temperatura en la herramienta tipo Sólido ( $v = 0.5[m/s]$  ;  $E=30000[J/m^2]$  )

- La deformación PEEQ en la pieza de trabajo: Principalmente se ha utilizado esta visualización para analizar el tipo de viruta creada en cada simulación. Este modo de visualizar los resultados permite observar, de forma muy visual, la evolución de la viruta según va avanzando la herramienta de corte.

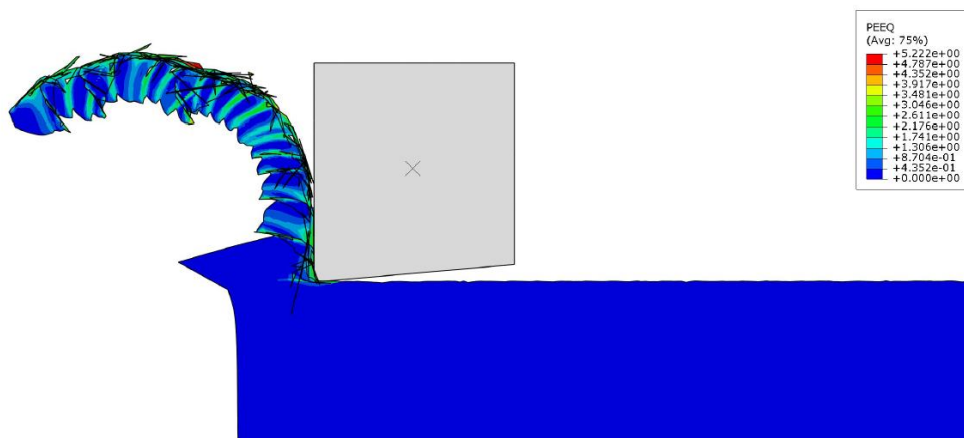


Fig. 47. . Evolución de la evolución de la viruta, modelo herramienta tipo Sólido ( $v = 0.5[m/s]$   $E=30000[J/m^2]$ )

- La fuerza de corte y fuerza de avance : Las fuerzas aplicadas durante el proceso de mecanizado se observan mediante una gráfica, como se puede observar en la Figura 48.

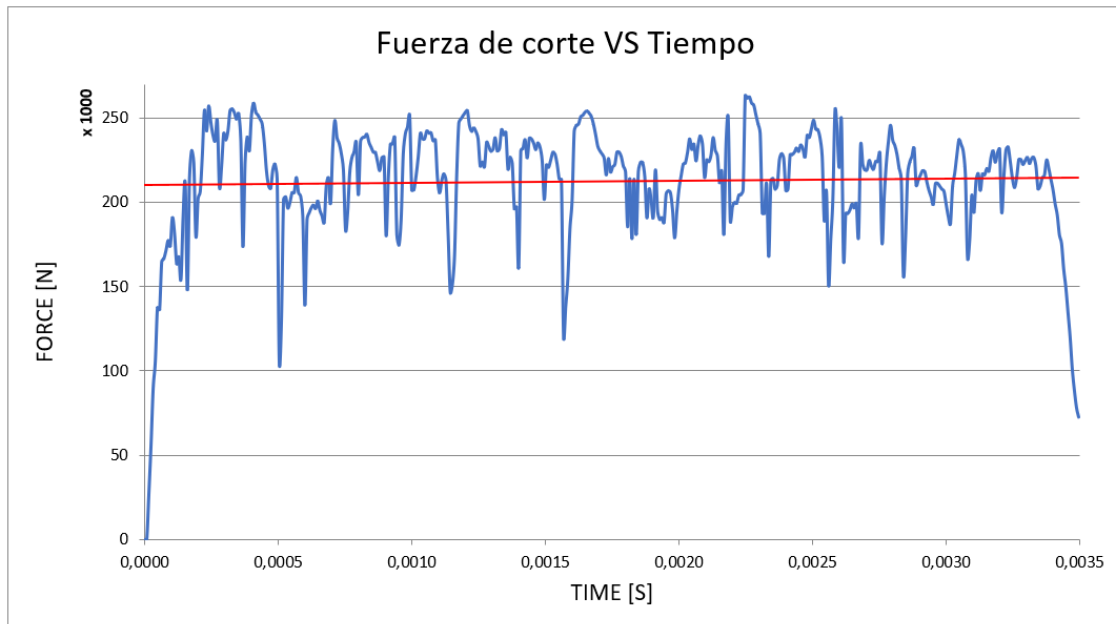


Fig. 48. Evolución de la Fuerza de corte en el modelo herramienta tipo Sólida ( $v = 0.5[m/s]$   $E=30000[J/m^2]$ )

## 4. RESULTADOS

Tras exponer las fases de caracterización del modelo a mecanizar, en este apartado, se va a analizar la influencia de la energía de fractura sobre las fuerzas de corte y avance, la morfología de la viruta formada y el aumento de la temperatura en el conjunto mecanizado, todo ello mediante los resultados obtenidos en las simulaciones. El segundo punto de estudio es la optimización del tiempo de simulación, para ello se han utilizado dos herramientas diferentes, Wire y Solida. La herramienta Sólido es la modelización de la herramienta real, mientras que la herramienta tipo Wire es una simplificación de la misma para disminuir el tiempo de simulación.

En primer lugar, para contextualizar el estudio experimental realizado se va a mostrar una tabla que expone de una manera simple las simulaciones realizadas con sus parámetros correspondientes. Como se ha mencionado anteriormente, el objeto de estudio es la influencia de la energía de fractura en determinados parámetros.

En la Tabla 11 se observan todas las simulaciones realizadas para el presente proyecto (marcadas con la letra 'S'), definiendo en cada una de ellas el valor de los parámetros utilizados:

Tabla 11. Variación de las propiedades básicas de las simulaciones de mecanizado realizadas.

	Modelo herramienta tipo WIRE			Modelo herramienta tipo SÓLIDO		
	Velocidad de avance [m/s]			Velocidad de avance [m/s]		
	0,5	3	15	0,5	3	15
25000	S	S	S	-	-	-
30000	S	S	S	S	S	S
35000	S	S	S	S	S	S
40000	S	S	S	S	S	S
42000	-	-	-	S	S	S
45000	S	S	S	S	S	S
50000	S	S	S	-	-	-
55000	S	S	S	-	-	-
60000	S	S	S	-	-	-
65000	S	S	S	-	-	-
70000	S	S	S	-	-	-
75000	S	S	S	-	-	-

#### 4.1 Fuerzas de avance y de corte, simulación Ti-6Al-4V.

Los resultados experimentales se han realizado mediante simulaciones del Ti-6Al-4V con el software ABAQUS. En el capítulo dedicado a ABAQUS se mostró que los resultados referentes a las fuerzas de avance y de corte se muestran mediante gráficas.

Como se ha mencionado en la introducción de los resultados se ha obtenido un gran número de simulaciones. Esta pluralidad se ha logrado variando diferentes parámetros como la velocidad de corte, la energía de fractura y la herramienta utilizada en la operación de corte.

En el presente apartado, se van a analizar los valores de las fuerzas de corte y avance obtenidos en las simulaciones.

El análisis se sintetizará como la influencia de cada variable sobre el resultado obtenido, para ello, se mostrará la influencia de la velocidad de corte, de la energía de fractura y de la morfología de la viruta. Por último, se realizará una comparación entre los resultados obtenidos con las herramientas tipo Wire y tipo Sólido.

Tras completar los análisis anteriores, se realizará una comparación de los resultados de nuestro modelo frente a resultados de modelos similares [17], para comprobar la coherencia de estos.

##### Influencia de la morfología de la viruta frente a las fuerzas

La variación de la viruta se explicará más detalladamente en futuros apartados, pero su influencia en los valores de las fuerzas es importante para entender los resultados obtenidos. La morfología de la viruta obtenida, al mecanizar ortogonalmente la aleación Ti-6Al-4V, es de tipo segmentada como se puede apreciar en la Figura 50 :



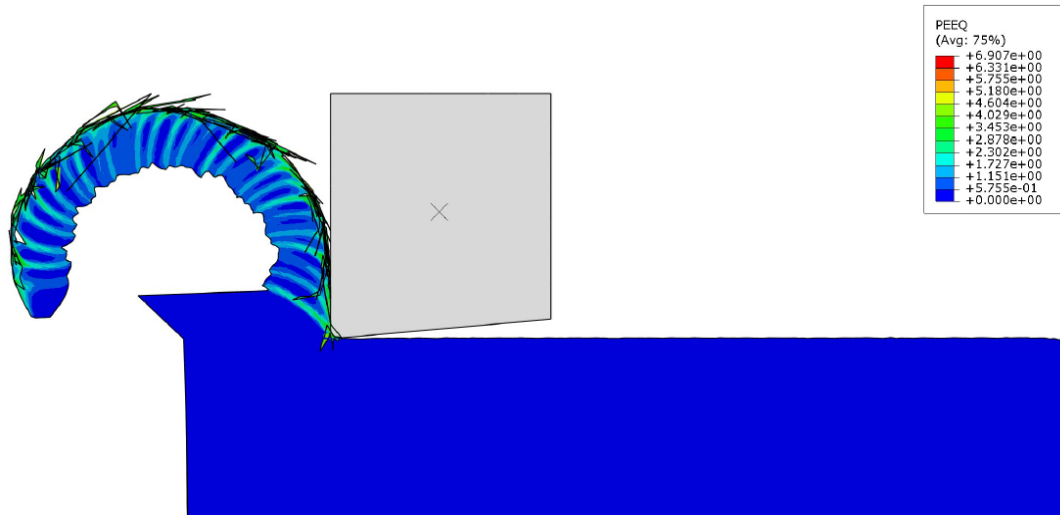


Fig. 49. Simulación de mecanizado Ti-6Al-4V utilizando herramienta tipo Sólido ( $E = 40000 \text{ [J/m}^2\text{]}$   $v = 3 \text{ [m/s]}$ )

La formación de este tipo de viruta influye notablemente en los valores puntuales de las fuerzas de avance y corte del material. La principal consecuencia de la creación de viruta segmentada es el aumento o disminución de la fuerza aplicada en momentos consecutivos del mecanizado.

En la parte teórica, se muestra el procedimiento de formación de viruta segmentada y su estrecha relación con la aparición de las bandas de cizalladura. Además, se determina que la formación de las bandas se produce mediante el avance de la herramienta sobre la pieza de trabajo. El proceso es el siguiente:

La herramienta comienza la operación de corte sobre la pieza de trabajo ocasionando un contacto herramienta-pieza. El contacto entre ambos materiales origina un aumento de temperatura que ablanda el material de la pieza de trabajo y, en consecuencia, la viruta formada. El avance de la herramienta causa en la viruta ablandada bandas de cizalladura, autoras de la formación de los dientes característicos de la viruta segmentada.

Durante la formación de cada banda de cizalladura se produce un gran aumento y posterior descenso del valor de las fuerzas.

En la Figura 50, se puede observar un ejemplo de la variación descrita anteriormente marcada mediante círculos de color rojo:

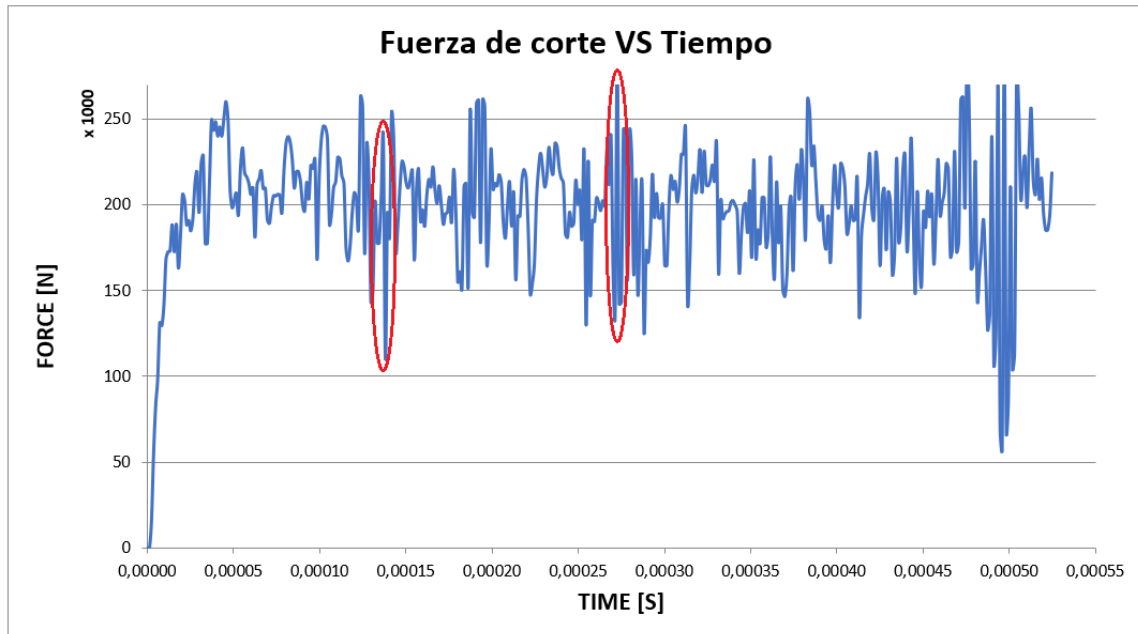


Fig. 50. Variaciones provocadas por la morfología de la viruta (Simulación Ti-6Al-4V herramienta tipo Sólido  $E = 40000$  [J/m<sup>2</sup>]  $v = 3$  [m/s])

#### Influencia de la velocidad de corte frente a las fuerzas

Los resultados experimentales han mostrado la influencia de la velocidad de corte en el proceso de mecanizado. Se han analizado los efectos producidos en las diferentes fuerzas al variar los valores de las velocidades de corte entre los siguientes valores: 0.5 m/s, 3 m/s y 15 m/s

Al aumentar la velocidad de corte, las fuerzas aplicadas sobre la pieza disminuyen hasta llegar a un estado estable. Este hecho destaca especialmente durante el mecanizado a bajas velocidades (0.5 m/s y 3 m/s), donde se observa un notorio descenso del valor de las fuerzas aplicadas. Por otro lado, las fuerzas aplicadas tienden a un estado de estabilidad durante el mecanizado a altas velocidades (15 m/s).

El motivo de la progresiva disminución y posterior estabilización del valor de las fuerzas, bajo una determinada energía de fractura y variación de la velocidad, se debe al aumento de temperatura del material.

Existe una relación directa entre la velocidad de corte utilizada y la temperatura del material y, en consecuencia, sobre el ablandamiento del mismo. Las fuerzas necesarias para realizar la operación de corte disminuyen al aumentar el ablandamiento del material.

Por lo tanto, una operación de corte realizada a altas velocidades se caracteriza por la disminución de las fuerzas de corte y avance. Hay que destacar dos conceptos:

Por una parte, a partir de una determinada velocidad de corte las fuerzas van a tender a estabilizarse. Por otra parte, los valores obtenidos de las fuerzas de corte se caracterizan por poseer un valor mayor que las fuerzas de avance, en torno al doble.

A continuación, se muestran los datos sintetizados de las simulaciones realizadas con una determinada energía de fractura. En la Figura 51, se observan los valores que alcanzan las velocidades de corte y avance, su valor según la herramienta de corte utilizada y el valor de la velocidad.

La línea de la gráfica, en todos los casos, se define con una tendencia exponencial, aumentando notablemente con velocidades de corte bajas y estabilizándose a medida que aumenta la velocidad de corte:

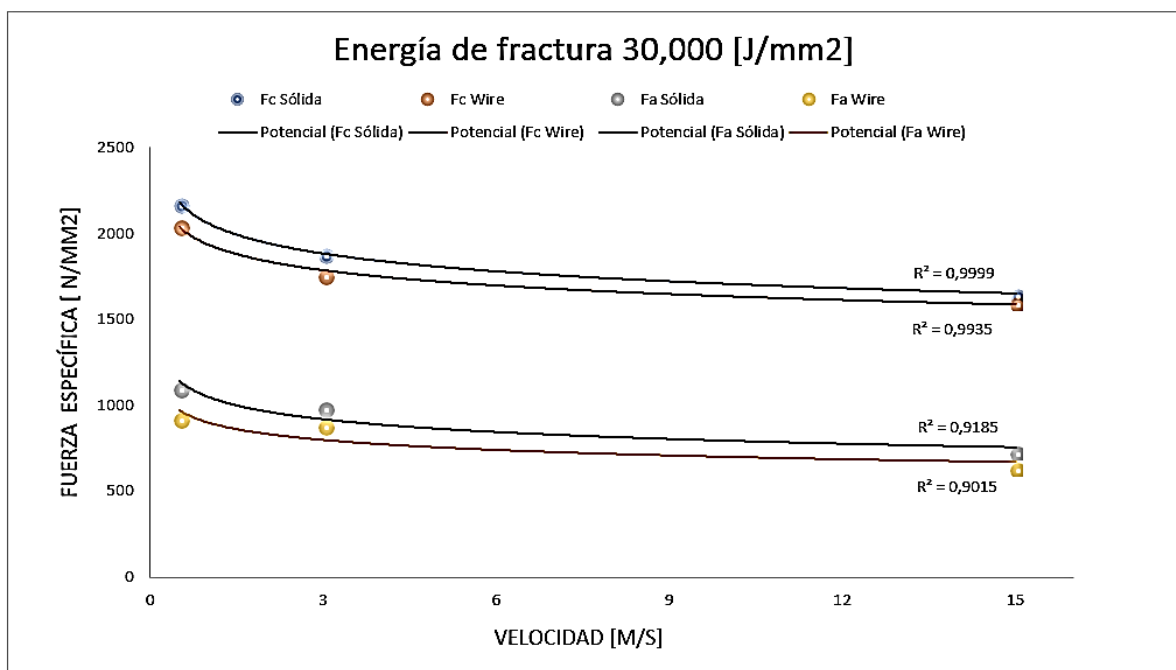


Fig. 51. Evolución de las fuerzas de mecanizado en función de la velocidad ( $E = 30000 \text{ [J/m}^2\text{]}$ )

### Influencia de la energía de fractura sobre las fuerzas

En las operaciones de mecanizado, la formación de viruta se debe a una cizalladura intensa entre la herramienta y el material de trabajo, zona denominada de corte primario. En condiciones de mecanizado de alta velocidad la zona de corte primario está

sometida a grandes aumentos de temperatura, elevadas tensiones... un elevado valor de la energía de fractura ( $G_f$ ) permite al material grandes deformaciones antes de su rotura total.

Para la realización de las simulaciones del Ti-6Al-4V se ha utilizado un amplio rango de valores de la energía de fractura del material, desde  $G_f = 25000 \text{ [J/m}^2\text{]}$  hasta  $G_f = 75000 \text{ [J/m}^2\text{]}$ .

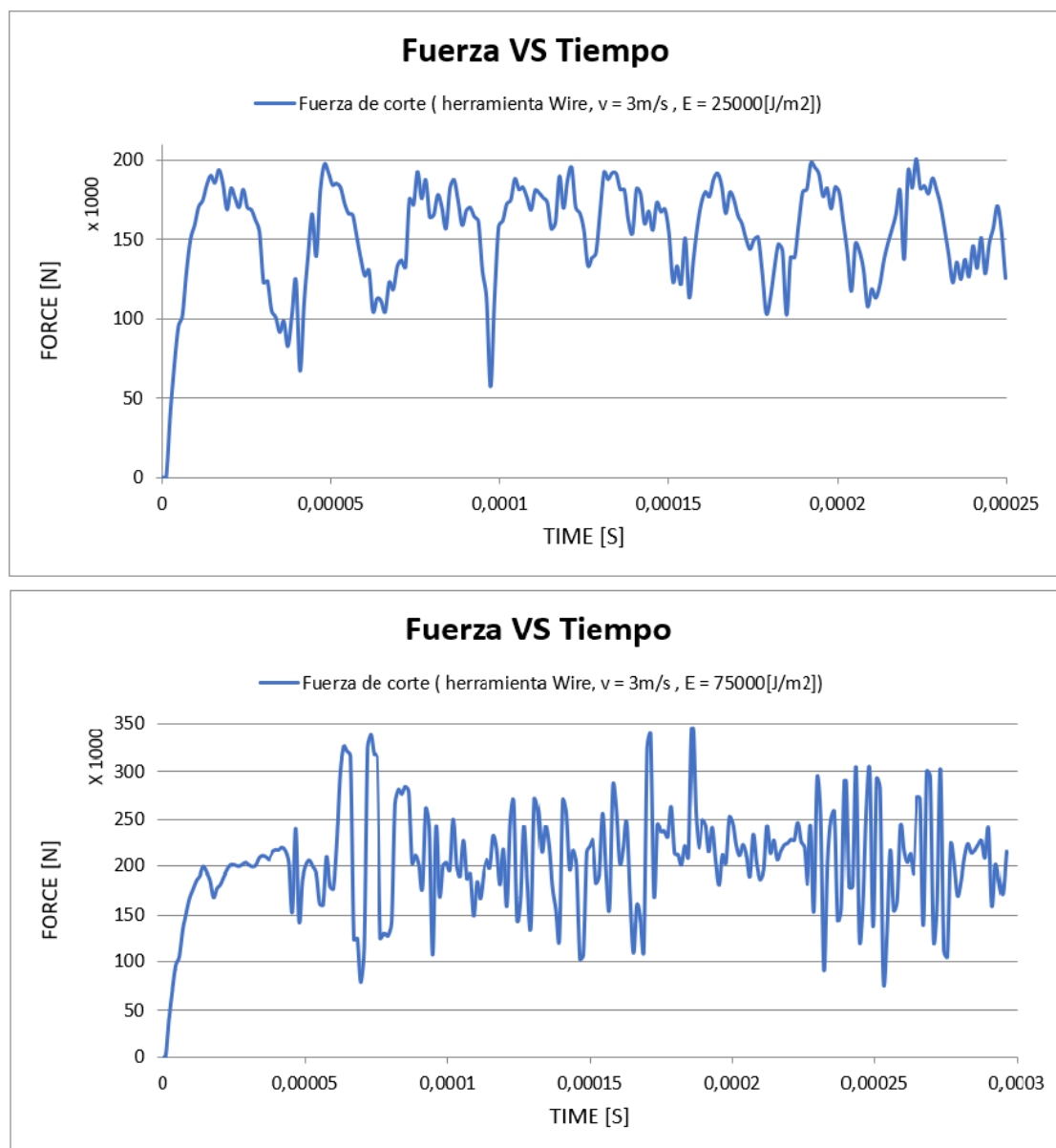


Fig. 52. Comparación de fuerzas de corte, simulación Ti-6Al-4V herramienta tipo WIRE:  $v = 3\text{m/s}$ ,  $E = 25000\text{[J/m}^2\text{]}$  (gráfica superior),  $E = 75000\text{[J/m}^2\text{]}$  (gráfica inferior)

En la Figura 52, se puede observar la comparación de los diferentes valores de la fuerza de corte en dos simulaciones con diferentes energías de fractura,  $E = 25000 \text{ [J/m}^2\text{]}$  y  $E = 75000 \text{ [J/m}^2\text{]}$ . El resto de los parámetros utilizados en las simulaciones de la imagen son idénticos, misma herramienta de corte (tipo Wire) e idéntica velocidad de corte, 3 m/s. Visualmente se puede apreciar el aumento del valor de la fuerza de corte producido al aumentar la energía de fractura del material, el valor medio de la fuerza de corte del modelo con baja energía de fractura se estima en 155 [N] y en el modelo con alta energía de fractura se estima en 225 [N].

En el ejemplo de la Figura 52 ambos modelos están trabajando a bajas velocidades de corte. Por lo tanto, la baja energía transmitida al material no es suficiente para provocar deformación y un aumento de la temperatura debido al trabajo plástico [17]. En consecuencia, al aumentar la energía de fractura manteniendo la misma velocidad de corte las fuerzas aplicadas a la pieza de trabajo serán mayores.

#### Resultados experimentales sobre el estudio de las fuerzas del mecanizado del Ti-6Al-4V

En este apartado se van a analizar los resultados obtenidos de las simulaciones Ti-6Al-4V. Se mostrará la influencia de la variación de la energía de fractura en simulaciones con diferentes herramientas y velocidades de corte. Por último, se analizarán los resultados comparándolos con estudios experimentales realizados con anterioridad [18] [17].

Tabla 12. Comparación entre las fuerzas de mecanizado del Ti-6Al-4V utilizando herramienta tipo Sólido y tipo Wire.

Energía de fractura	V corte	Fuerza corte [N/mm <sup>2</sup> ]			Fuerza de avance [N/mm <sup>2</sup> ]		
		0,5 [m/s]	3 [m/s]	15 [m/s]	0,5 [m/s]	3 [m/s]	15 [m/s]
30000 [J/mm <sup>2</sup> ]		2177,49	1886,02	1650,24	1103,8	986,37	728,85
		2048,24	1765,3	1596,63	924,65	885,7	634,91
35000 [J/mm <sup>2</sup> ]		2251,11	1921,21	1703,13	1154,58	1058,63	787,49
		2048,04	1890,95	1630,21	990,27	887,95	548,51
40000 [J/mm <sup>2</sup> ]		2264,07	2015,34	1850,33	1167,73	1066,71	927,69
		2086,97	1903,02	1770,38	994,93	895,31	757,84
45000 [J/mm <sup>2</sup> ]		2371,54	2071,87	2004,32	1185,48	1060,53	955,3
		2077,6	2032,64	1890,94	1025,74	965,87	815,78

	Herramienta tipo Sólido
	Herramienta tipo Wire

En la Tabla 12 se encuentran sintetizados los valores numéricos de las fuerzas de corte y de avance aplicadas durante la operación de corte del material de estudio.

Los datos están clasificados según la herramienta utilizada, la energía de fractura del material, la velocidad de corte aplicada y la fuerza de estudio, de corte o avance. Observando los resultados numéricos se pueden deducir tres conclusiones:

- El aumento del valor de la energía de fractura provoca un aumento del valor de las fuerzas de corte y avance. El aumento sucede independientemente de la herramienta utilizada, la fuerza de estudio o la velocidad de corte aplicada en la simulación.

La explicación del aumento del valor de las fuerzas se relaciona con la energía de fractura del material. Al aumentar el valor de la energía de fractura, el valor de la energía aplicada en la operación de corte debería aumentar proporcionalmente para provocar mayor deformación en el material y un aumento de la temperatura a causa del trabajo plástico.

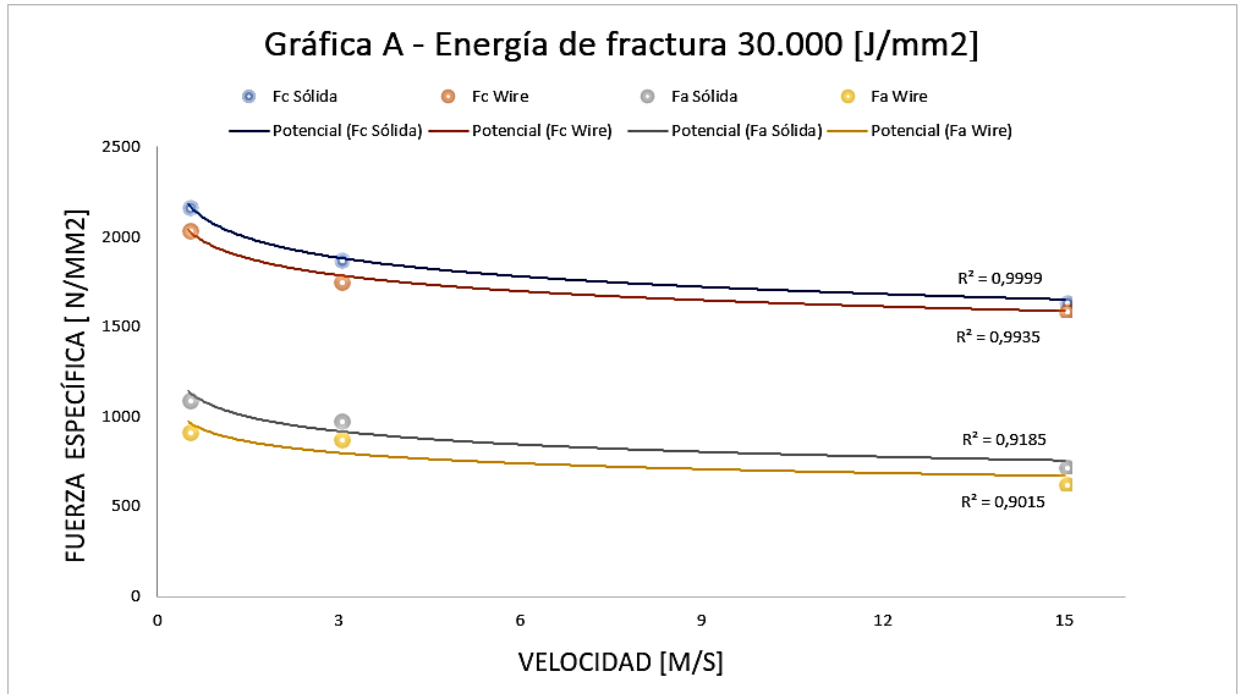


Fig. 53. Gráfica A que muestran el valor de las fuerzas de corte y avance en función de la velocidad de corte, la herramienta y la energía de fractura aplicada ( $E = 30.000 \text{ [J/mm}^2\text{]}$ ).

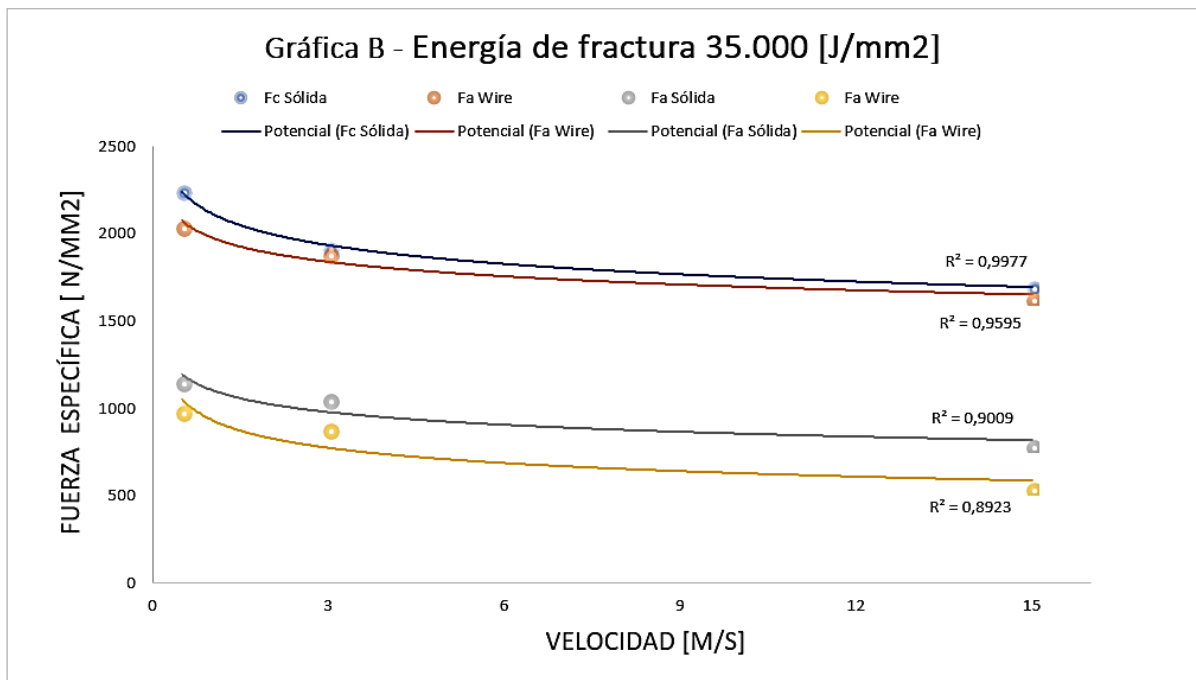


Fig. 54. Gráfica B que muestran el valor de las fuerzas de corte y avance en función de la velocidad de corte, la herramienta y la energía de fractura aplicada ( $E = 35.000 \text{ [J/mm}^2\text{]}$ ).

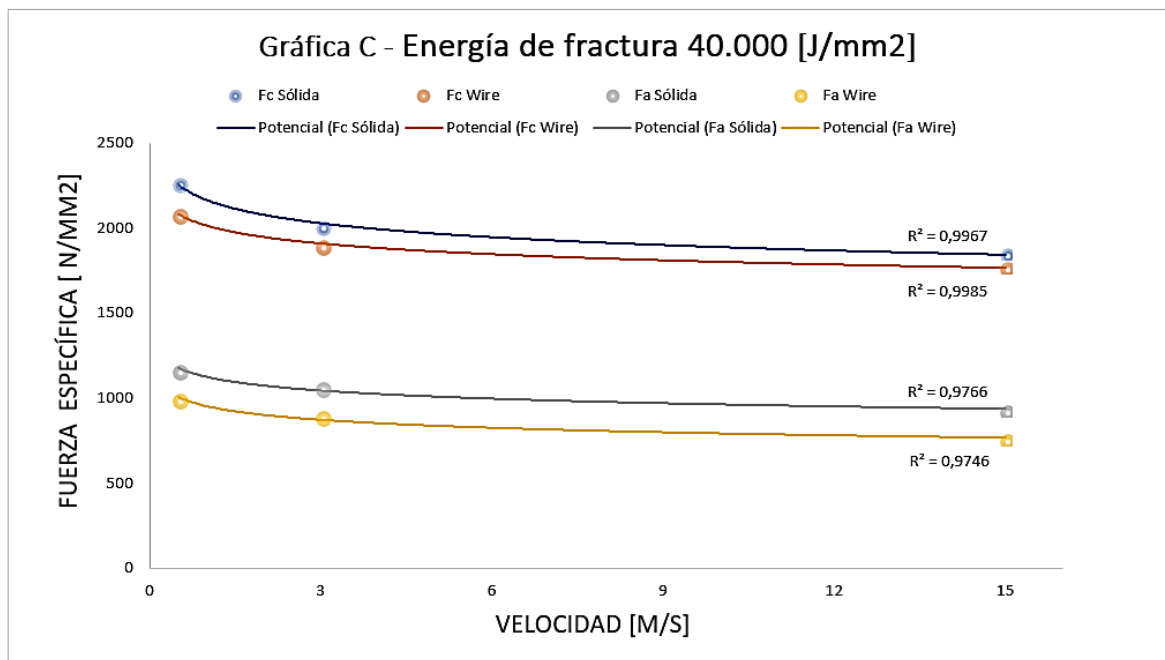


Fig. 55. Gráfica C que muestran el valor de las fuerzas de corte y avance en función de la velocidad de corte, la herramienta y la energía de fractura aplicada ( $E = 40.000 \text{ [J/mm}^2\text{]}$ ).

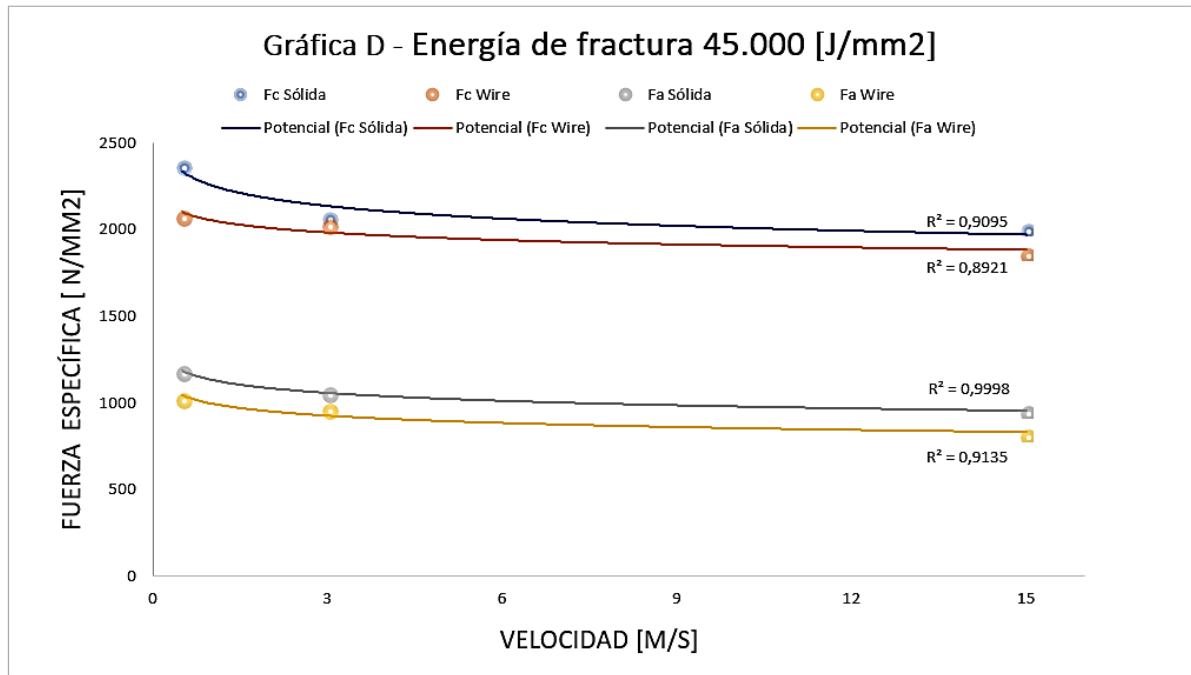


Fig. 56. Gráfica D que muestran el valor de las fuerzas de corte y avance en función de la velocidad de corte, la herramienta y la energía de fractura aplicada ( $E = 45.000 \text{ [J/mm}^2\text{]}$ ).

- El aumento de las velocidades de corte provoca una disminución de las fuerzas aplicadas. Como se ha mencionado en su apartado correspondiente, esta disminución del valor de la fuerza es provocada por el aumento del ablandamiento del material al aumentar la velocidad de corte. El valor de las fuerzas disminuye de forma más pronunciada a bajas velocidades y tiende a estabilizarse a altas velocidades de corte. En las Figuras 53, 54, 55 y 56, se puede observar la tendencia del valor de las fuerzas.
- Los resultados experimentados por ambas herramientas (en el Anexo 2 se muestran los resultados) son muy similares. En las gráficas de las Figuras 53, 54, 55 y 56, se puede observar como la tendencia de cualquiera de las fuerzas de ambas modelos son casi paralelas, pero hay que destacar que el modelo que utiliza la herramienta Wire experimenta fuerzas un poco menores que el modelo con la herramienta tipo Sólido.

Hay que comentar que las simulaciones realizadas con la herramienta tipo Wire tienen un tiempo de procesado casi tres veces menor, en determinadas simulaciones, que una simulación realizada con el modelo con herramienta tipo Sólido. En la tabla 13 están reflejados los tiempos de simulación de todas las simulaciones realizadas:



Tabla 13. Tabla que muestra los tiempos de procesamiento de todas las simulaciones realizadas.

	<b>Modelo herramienta tipo WIRE</b>			<b>Modelo herramienta tipo SÓLIDO</b>		
	<b>Velocidad de avance [m/s]</b>			<b>Velocidad de avance [m/s]</b>		
	0,5	3	15	0,5	3	15
	25000	30000	35000	40000	42000	45000
<b>Energía de fractura [J/mm<sup>2</sup>]</b>	253 [min]	22 [min]	14 [min]	-	-	-
	91 [min]	49 [min]	12 [min]	239 [min]	77 [min]	18 [min]
	108 [min]	51 [min]	14 [min]	239 [min]	79 [min]	19 [min]
	115 [min]	46 [min]	12 [min]	234 [min]	76 [min]	19 [min]
	-	-	-	200 [min]	76 [min]	19 [min]
	113 [min]	46 [min]	12 [min]	185 [min]	78 [min]	25 [min]
	89 [min]	50 [min]	6 [min]	-	-	-
	110 [min]	43 [min]	6 [min]	-	-	-
	93 [min]	43 [min]	4 [min]	-	-	-
	78 [min]	25 [min]	5 [min]	-	-	-
	70000	64 [min]	26 [min]	6 [min]	-	-
	75000	56 [min]	25 [min]	5 [min]	-	-

Enfocándose en los resultados de las fuerzas se puede optimizar el proceso de simulación de dos formas diferentes:

La primera forma consiste en realizar las simulaciones pertinentes utilizando directamente el modelo de la herramienta tipo Wire. Al realizar las simulaciones se asumiendo que los resultados tienen un error aproximado del 5% respecto al modelo con herramienta tipo Sólido.

La segunda opción permite obtener valores muy similares a los obtenidos mediante el modelo con herramienta Sólido. Para realizar esta optimización del proceso se debe emplear una energía de fractura con un valor superior a la energía de fractura. Utilizando la herramienta tipo Wire con un suplemento de 5.000 [J/mm<sup>2</sup>] del valor de energía de fractura deseada se obtiene un error no superior al 1%. En conclusión, el proceso se ha conseguido optimizar.

Un ejemplo de lo descrito anteriormente se puede observar en la Tabla 14. En la siguiente tabla se realiza una comparación entre el valor de las fuerzas y el tiempo de simulación de las simulaciones realizadas con los diferentes modelos :

Tabla 14. Comparación de las fuerzas de corte y tiempos de simulación: Herramientas, Sólido y Wire, Energías de fractura,  $G = 30000, 35000, 40000$  y  $45000$  [J/mm<sup>2</sup>] y Velocidad de corte  $v=3$  m/s.

Fuerza de corte [N/mm <sup>2</sup> ]			
Modelo con herramienta tipo Sólido	E = 30.000 [J/mm <sup>2</sup> ] 1886.02 [N/mm <sup>2</sup> ] 77 [min]	E = 35.000 [J/mm <sup>2</sup> ] 1921.21 [N/mm <sup>2</sup> ] 79 [min]	E = 40.000 [J/mm <sup>2</sup> ] 2015.34 [N/mm <sup>2</sup> ] 76 [min]
Modelo con herramienta tipo Wire	E = 35.000 [J/mm <sup>2</sup> ] 1890,95 [N/mm <sup>2</sup> ] 51 [min]	E = 40.000 [J/mm <sup>2</sup> ] 1903.02 [N/mm <sup>2</sup> ] 46 [min]	E = 45.000 [J/mm <sup>2</sup> ] 2032.64 [N/mm <sup>2</sup> ] 46 [min]

En este ejemplo se observa que el error es inferior al 1%, hay que comentar que este método de optimización no es tan preciso para la obtención de los valores de las fuerzas de avance que poseen un error aproximado del 3%.

Para finalizar el apartado de los resultados de las fuerzas, se van a comparar los resultados obtenidos con los valores obtenidos experimentalmente en diferentes trabajos de investigación, [5] [12] [13].7

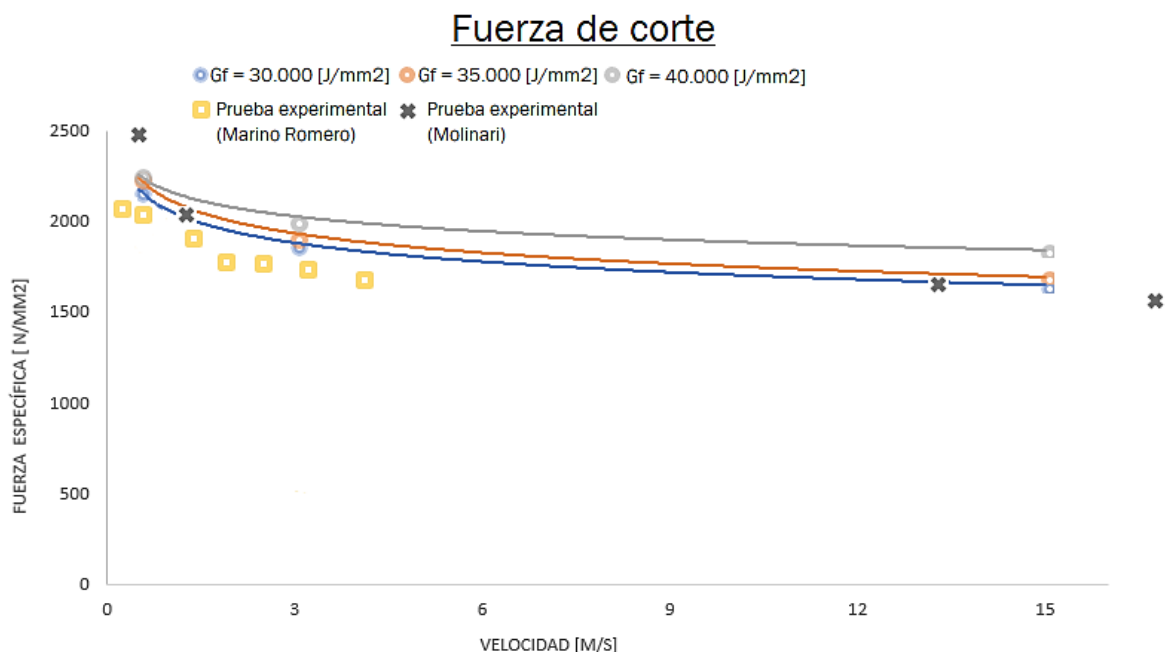


Fig. 57. Comparación de simulaciones, modelo con herramienta tipo Sólido  $G_f=30000, 35000$  y  $40000$  [J/mm<sup>2</sup>], con datos experimentales de fuentes externas. [13] [12].

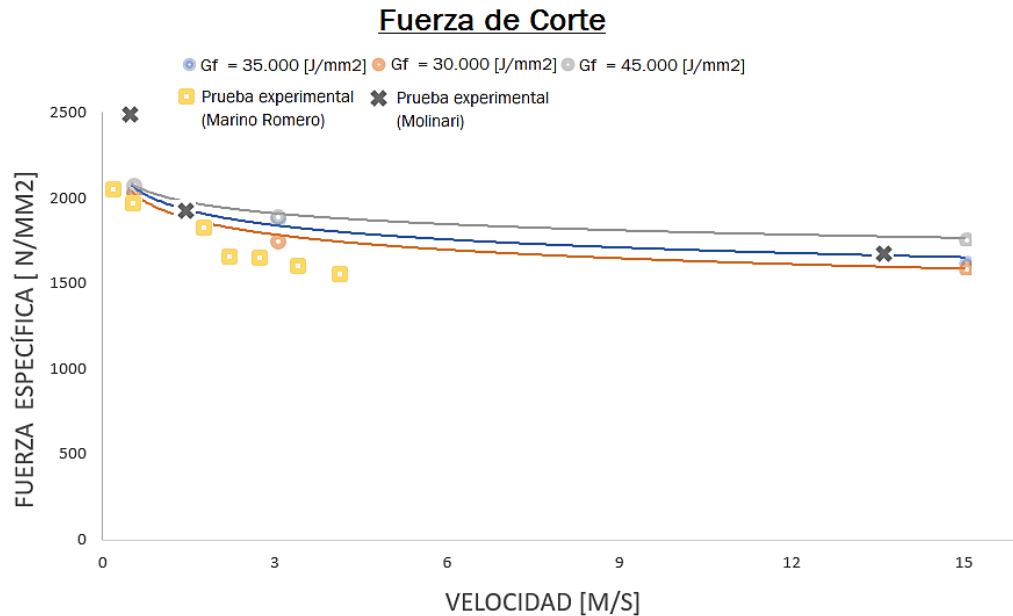


Fig. 58. Comparación de simulaciones, modelo con herramienta tipo Wire  $G_f=35.000$ ,  $40.000$  y  $45.000 \text{ [J/mm}^2\text{]}$ , con datos experimentales de fuentes externas. [13] [12]

Se han realizado una comparación de los resultados obtenidos con datos de simulaciones realizadas en trabajos de investigación de diferentes autores, específicamente de Marino Romero [13] y Molinari [12]. La verificación de las simulaciones demuestra la coherencia de los resultados realizados en el presente proyecto.

Las simulaciones utilizadas para la comparación se han realizado con el modelo de la herramienta tipo Sólido y tipo Wire, y energías de fractura comprendidas entre los valores  $30.000$  y  $45.000 \text{ [J/mm}^2\text{]}$ . Gráficamente se observa en las Figuras 57 y 58 la semejanza de la tendencia de las fuerzas de corte en función de la velocidad de corte. Especialmente se observa gran similitud en los valores experimentales aportados por la documentación de Molinari, donde coinciden dos de los cuatro puntos en el modelo con herramienta tipo Wire ( $G_f=35.000 \text{ J/mm}^2$ ) y en el modelo tipo Sólido ( $G_f=35.000 \text{ J/mm}^2$ ).

En cuanto a los datos graficados de la investigación de Marino Romero, se observa que la tendencia de los valores es similar, pero, los resultados numéricos son menores que los realizados en nuestras simulaciones.

En conclusión, se puede afirmar que los resultados de las simulaciones realizadas con la herramienta tipo Wire son coherentes con los resultados que experimentaría el material durante un proceso de mecanizado real, el proceso se ha optimizado con relación al tiempo de simulación.

#### 4.2 Análisis de la formación de viruta durante la simulación del mecanizado ortogonal del Ti-6Al-4V.

En este apartado se va a analizar la variación de la morfología de viruta en función de la velocidad de corte y de la energía de fractura. Posteriormente se realizará la comparación de los resultados de con los diferentes modelos de herramientas. Para realizar el análisis de la viruta se ha realizado fotografías de cada una de las simulaciones realizadas en el software ABAQUS.

Para obtener una visión objetiva del análisis todas las imágenes se obtendrán en el mismo momento de la operación de corte, exceptuando los casos en los que la simulación finaliza antes debido a una excesiva distorsión. Las imágenes se realizarán en el módulo ``VISUALIZATION`` del programa, visualizando la operación en modo PEEQ (deformación plástica de los puntos integrados). Para realizar el análisis de las imágenes se van a utilizar diferentes simulaciones con sus respectivas condiciones de contorno:

- Para la observación de la variación de la morfología de viruta, en función de la velocidad de corte, se van a utilizar imágenes de las simulaciones realizadas con el modelo de la herramienta tipo Sólido (velocidades comprendidas entre 0.5 y 15 m/s y una energía de fractura con valor  $G_f = 30.000 \text{ [J/mm}^2\text{]}$ ).
- El segundo análisis realizado será la comparación de los modelos que utilizan herramientas tipo Sólido y tipo Wire. Esta comparación se realizará utilizando las imágenes de las simulaciones realizadas con los modelos de las herramientas tipo Sólido y tipo Wire con las siguientes condiciones de contorno :  $v = 0.5\text{-}15 \text{ [m/s]}$  y  $G_f = 30.000 \text{ [J/mm}^2\text{]}$ .
- El último análisis de la morfología de la viruta se realizará observando las variaciones que provoca los diferentes valores de energía de fractura. Para ello, se utilizarán las imágenes de las simulaciones realizadas con el modelo de la herramienta tipo Wire, con una velocidad de corte de 3 m/s y valores de energía de fractura comprendidos entre 30.000 y 75.000  $\text{[J/mm}^2\text{]}$ .

##### Variación de la morfología de la viruta en función de la velocidad de corte

A continuación, en la Figura 59 se observa la variación de la morfología de la viruta al variar las velocidades de corte.

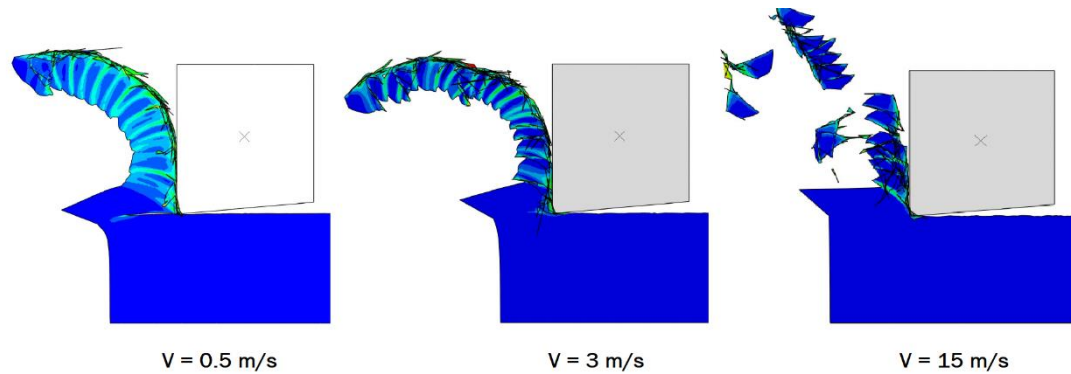


Fig. 59. Variación de la formación de viruta en función de la velocidad de corte ( Modelo con herramienta tipo Sólido,  $G_f = 30.000 \text{ [J/mm}^2\text{]}$ ,  $v = 0.5, 3, 15 \text{ [m/s]}$ )

Analizando las imágenes de las virutas se pueden sacar varias conclusiones:

La viruta de la simulación realizada con una velocidad de  $0.5 \text{ [m/s]}$  es una viruta caracterizada por su menor grado de segmentación. Se observa que la banda de cizalladura no es muy pronunciada, el motivo puede relacionarse con que las condiciones de contorno ( $v = 0.5 \text{ [m/s]}$ ) no favorezcan el aumento de temperatura y posterior ablandamiento del material, facilitando la segmentación de la viruta. También se observa que existe un gran contacto entre la viruta y la herramienta.

A medida que aumenta la velocidad de corte, se observa que la viruta obtiene mayores grados de segmentación. La viruta adquiere una forma dentada más definida, propia de las virutas segmentadas, al mismo tiempo, la superficie de contacto entre la herramienta y la viruta disminuye levemente.

Por último, cuando la velocidad de corte adquiere su valor más elevado,  $15 \text{ [m/s]}$ , la superficie de contacto entre la viruta y la herramienta continúa descendiendo. La viruta segmentada se fracciona en pequeños trozos.

Este comportamiento sucede en todas las simulaciones, la Figura 59 únicamente es un ejemplo del comportamiento de la viruta aplicable a cada una de las simulaciones.

En conclusión, la influencia de la velocidad de corte sobre la morfología de la viruta consiste en la formación de mayor viruta segmentada a medida que se aumenta la velocidad de corte. Una ventaja asociada al mayor grado de segmentación es la disminución del contacto entre la viruta y la herramienta, aumentando la vida de la herramienta.

### Variación de la morfología de la viruta en función de la herramienta de corte utilizada

La morfología de la viruta formada en cada una de las herramientas es claramente diferenciable, a pesar de estar formada en una simulación con idénticas condiciones de contorno.

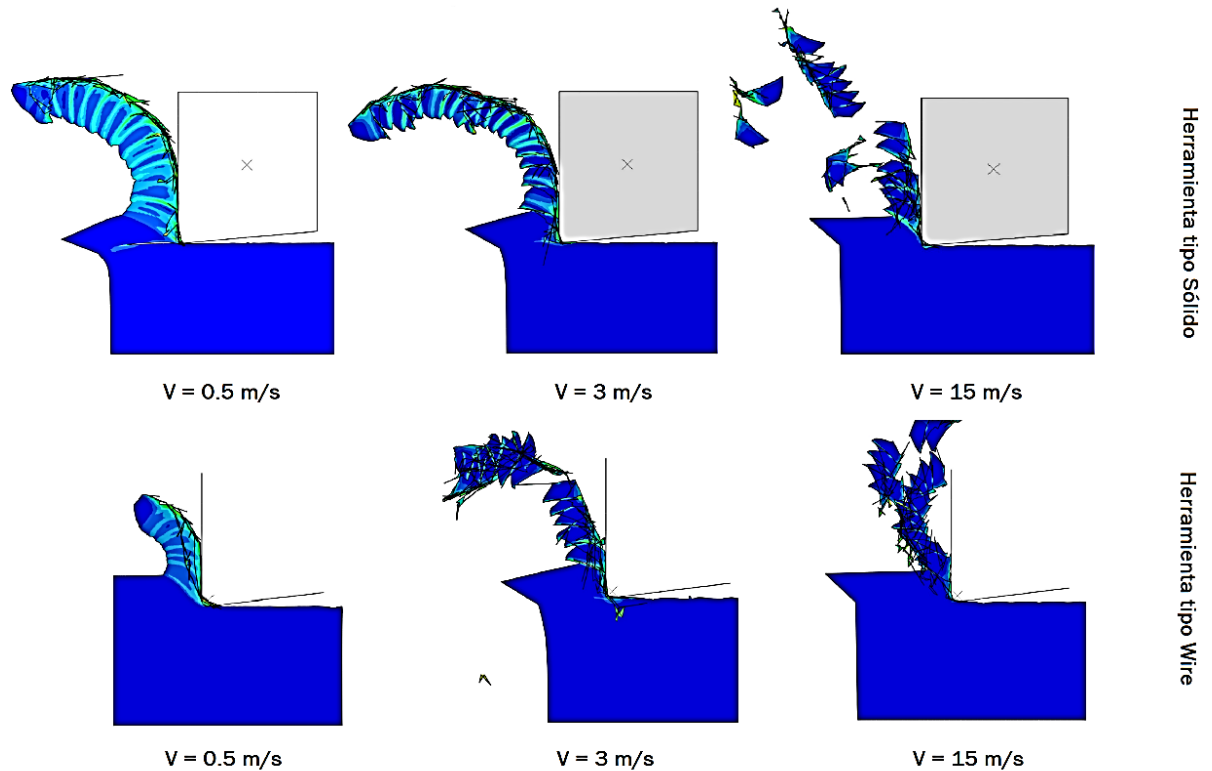


Fig. 60. Comparación de la viruta formada con diferentes herramientas e iguales condiciones de contorno ( $G_f = 30.000 \text{ [J/mm}^2\text{]}$   $v = 0.5, 3, 15 \text{ [m/s]}$ )

En la Figura 60 se observan las diferentes formaciones de viruta en cada una de las simulaciones. Las imágenes muestran simulaciones realizadas con las siguientes condiciones de contorno, herramientas tipo Sólido y tipo Wire, una energía de fractura,  $G_f = 30.000 \text{ [J/mm}^2\text{]}$ , y velocidades de corte comprendidas entre 0.5 y 15 m/s.

La principal diferencia que se aprecia el uso de las diferentes herramientas es el grado de segmentación de la viruta. El modelo con herramienta tipo Sólido experimenta la formación de viruta segmenta de una forma progresiva, hasta que la viruta se comienza a separar en numerosos trozos. Por el contrario, la viruta formada por la herramienta tipo wire presenta un gran grado de segmentación desde velocidades muy bajas, 3 m/s.

La razón por la cual se segmenta la viruta de una forma tan pronunciada, en el modelo de herramienta tipo Wire, es la forma constructiva de la herramienta. El modelo con

herramienta tipo Wire no permite el aumento de temperatura en su material debido a su diseño. Por lo tanto, el aumento de temperatura que sufre el material es mucho mayor que en el modelo con herramienta tipo Sólido. Este hecho se explica en el siguiente apartado donde se muestra la evolución de la temperatura según las diferentes condiciones de contorno.

#### Variación de la morfología de la viruta en función de la energía de fractura ( $G_f$ )

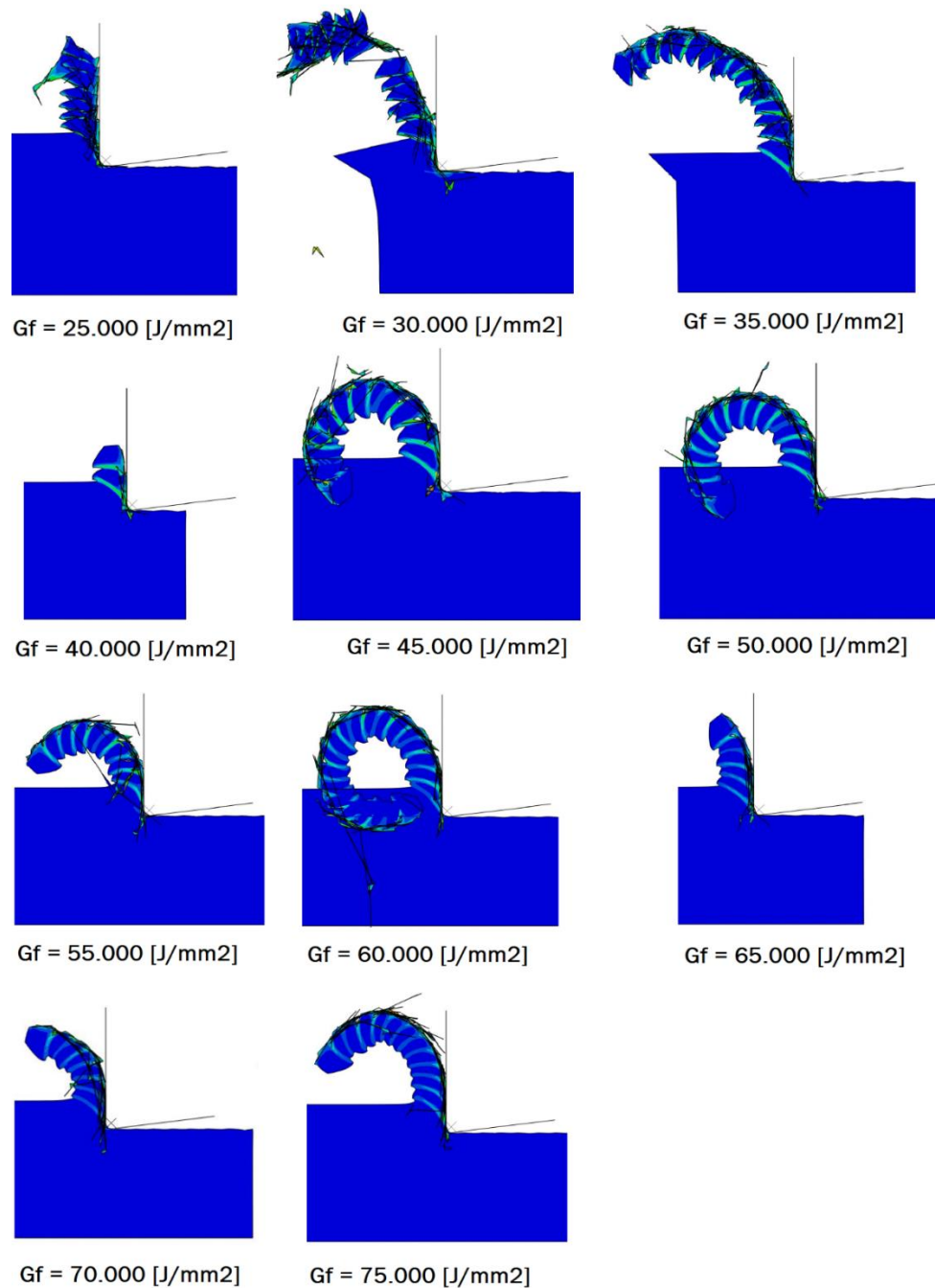


Fig. 61. Variación de la morfología de la viruta con diferentes energías de fractura ( Desde  $G_f = 25.000 \text{ [J/mm}^2\text{]}$  hasta  $G_f = 75.000 \text{ [J/mm}^2\text{]}$ )

En este apartado se va a analizar la variación de la formación de la viruta utilizando diferentes energías de fractura. Se van a comentar las variaciones de las virutas formadas en simulaciones con las siguientes condiciones de contorno, herramienta tipo Wire, velocidad de corte de 3 m/s y energías de fractura comprendidas entre los valores  $G_f = 25.000 \text{ [J/mm}^2\text{]}$  y  $G_f = 75.000 \text{ [J/mm}^2\text{]}$ . En la Figura 61 se muestran las imágenes de la viruta de las simulaciones mencionadas anteriormente.

Las simulaciones realizadas mediante el software ABAQUS no siempre finalizan satisfactoriamente, en la Figura 61, se observan dos imágenes de viruta que proceden de simulaciones interrumpidas. Las simulaciones referentes a las imágenes de energía de fractura  $G_f = 40.000 \text{ [J/mm}^2\text{]}$  y  $G_f = 65.000 \text{ [J/mm}^2\text{]}$  no se han completado a causa de excesiva distorsión, por lo tanto, la viruta formada no está completa.

Analizando el resto de las imágenes se puede observar una evolución de la viruta. La viruta proveniente de las simulaciones con menor energía de fractura, concretamente las simulaciones con energía de fractura  $G_f = 25.000 \text{ [J/mm}^2\text{]}$  y  $G_f = 30.000 \text{ [J/mm}^2\text{]}$ , muestran una viruta segmentada y discontinua. A medida que aumenta el valor de la energía de fractura la formación de la viruta cada vez muestra menor segmentación, los dientes característicos de este tipo de viruta cada vez son menos pronunciados.

El motivo del descenso de la viruta segmentada a medida que aumenta la energía de fractura es el siguiente:

Como se mostró en la parte teórica, la formación de viruta segmentada es provocado mediante un aumento de la temperatura que conlleva al ablandamiento del material, formando bandas de cizalladura. Al aumentar la energía de fractura aumenta la temperatura requerida a través del trabajo plástico. Por lo tanto, se necesita mayor energía para obtener el mismo grado de segmentación en la viruta. Como la velocidad de corte se mantiene constante y solo aumenta la energía de fractura, el resultado obtenido es una viruta con un menor grado de segmentación.

La conclusión obtenida tras el análisis de las imágenes de las diferentes virutas es el siguiente: La disminución de la energía de fractura, a igualdad de condiciones de contorno, provoca un aumento de la segmentación de la viruta. En consecuencia, variando los parámetros de velocidad de corte y energía de fractura del material se puede obtener el grado de segmentación deseado en la viruta.



Verificación de los resultados obtenidos.

En este apartado se comparan los resultados obtenidos mediante las simulaciones con las conclusiones obtenidas en investigaciones publicadas.

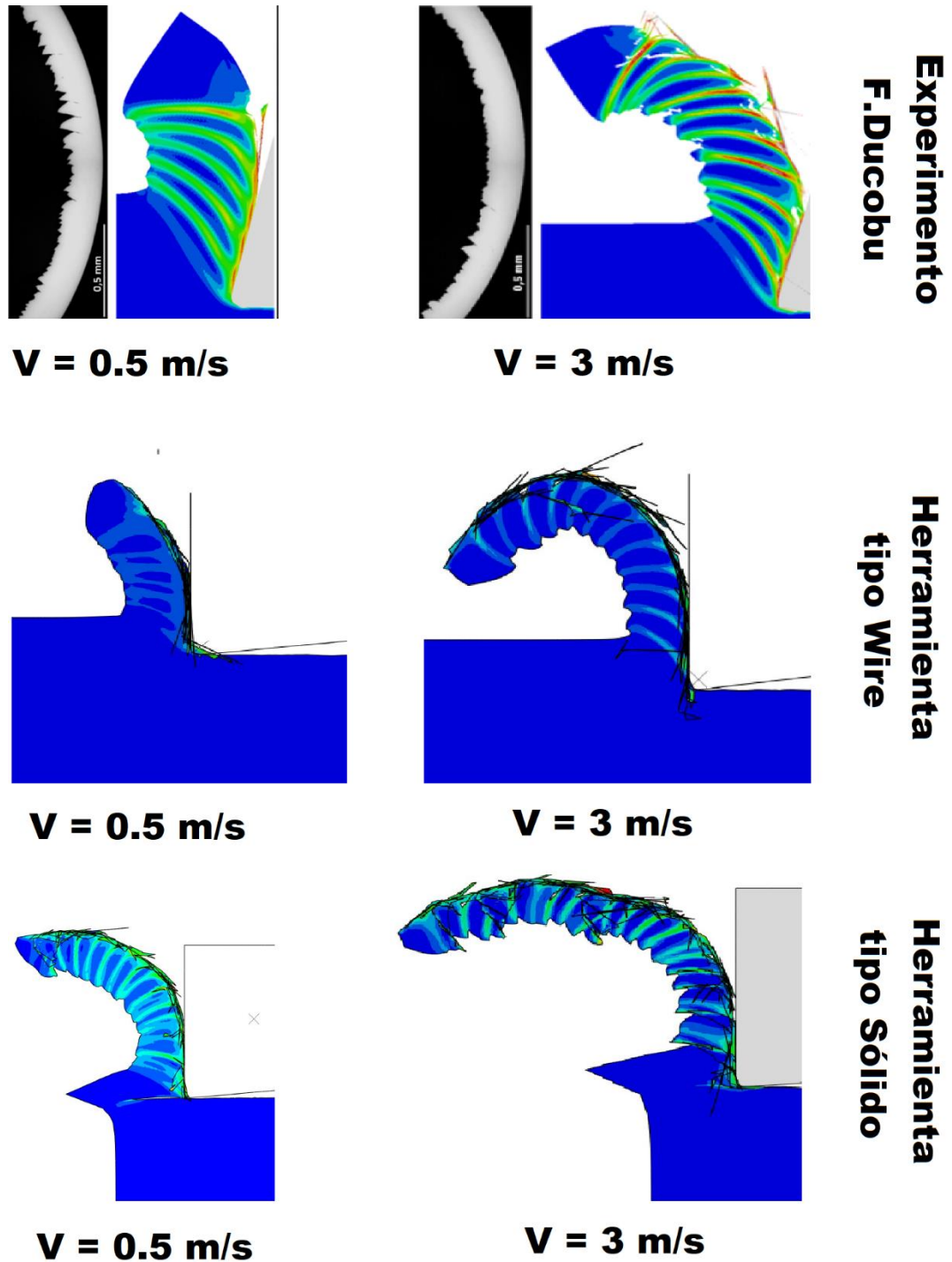


Fig. 62. Comparación de morfologías de virutas entre: Modelo herramienta tipo Wire ( $G_f=60.000[J/mm^2]$ ), herramienta tipo Sólido ( $G_f=30.000[J/mm^2]$ ) y experimento de F.Ducobu [4].

En la Figura 62 se comparan las virutas originadas por diferentes modelos de simulación, con herramienta tipo Sólido, con herramienta tipo Wire y el experimento de F.Ducobu [4].

Las conclusiones obtenidas tras la comparación de los diferentes modelos se exponen a continuación.

Las simulaciones realizadas con los diferentes modelos muestran una tendencia correcta en la morfología de la viruta. Observando esta característica se puede deducir que la viruta formada posee una morfología similar a la real.

Por otro lado, comparando los resultados obtenidos con la utilización de las diferentes herramientas se observa que la herramienta tipo Wire necesita el doble de energía de fractura para obtener un resultado similar.

En conclusión, la morfología de la viruta puede ser estudiada mediante la herramienta tipo Wire utilizando los valores correctos de energía de fractura.

#### 4.3 Evolución de la temperatura durante la simulación del mecanizado ortogonal del Ti-6Al-4V.

El último análisis realizado a los resultados de las simulaciones hace referencia a la temperatura generada en el proceso de mecanizado ortogonal del material de estudio. Concretando un poco más, el análisis hace referencia a la variación que sufre la temperatura al variar parámetros como la energía de fractura, la velocidad de corte o el tipo de herramienta utilizada.

En primer lugar, se va a realizar una comparación de la temperatura máxima experimentada en dos procesos de mecanización que utilizan herramientas diferentes. En la Figura 63, se muestran las temperaturas máximas experimentadas durante el proceso de mecanizado del Ti-6Al-4V, los datos de las temperaturas hacen referencia a simulaciones generadas con una velocidad de corte de 0.5 m/s, con las herramientas tipo Sólido y tipo Wire, y con diferentes energías de fractura.

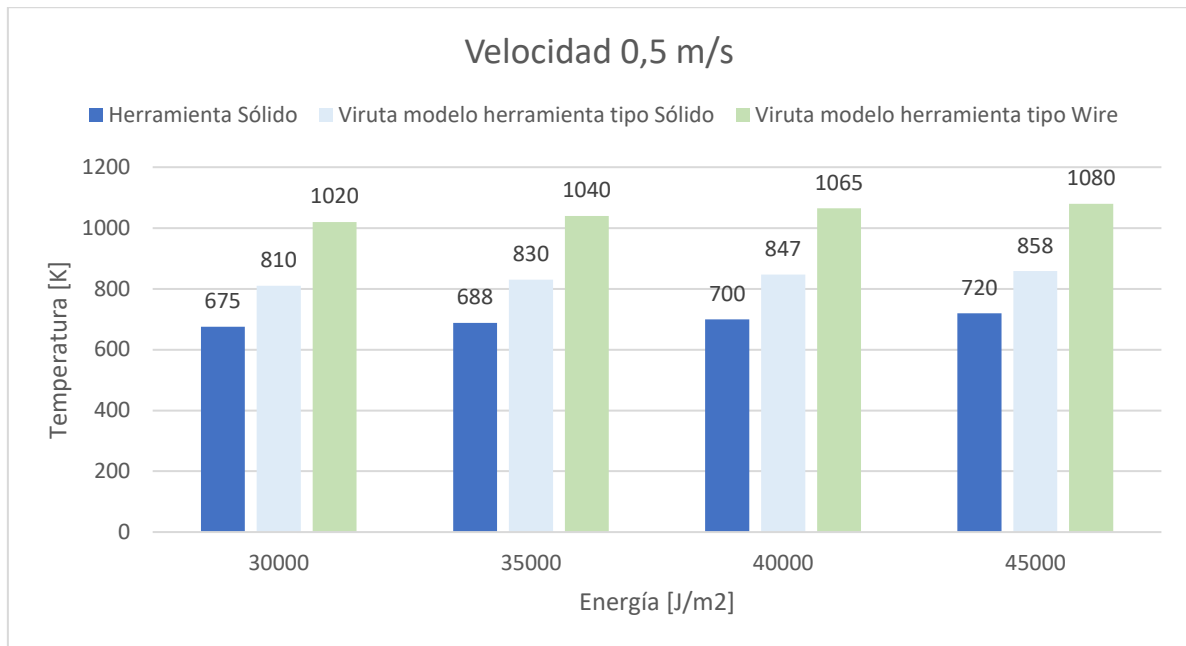


Fig. 63. Comparación de las temperaturas máximas experimentadas en el proceso de mecanizado ortogonal del Ti-6Al-4V ( $v = 0.5$  m/s).

Centrándose únicamente en el parámetro de la variación de herramienta, la conclusión obtenida tras analizar los datos expuestos en la gráfica se muestra a continuación:

El valor de la temperatura de la viruta en la simulación que utiliza la herramienta tipo Wire es pronunciadamente mayor que la temperatura de la viruta de la otra simulación, la diferencia es de aproximadamente 200 K.

En este caso la explicación para este fenómeno se explica con el modelado de la herramienta tipo Wire. El modelo que utiliza la herramienta tipo Sólido muestra un comportamiento muy parejo a la realidad, en este caso, se demuestra observando cómo es capaz de absorber parte de la energía liberada en forma de calor durante el proceso de mecanizado. Por el contrario, la herramienta tipo Wire no tiene la capacidad de absorber energía y, en consecuencia, toda la energía producida en el proceso de mecanizado es absorbida por la viruta, provocando un notable aumento de su temperatura.

En segundo lugar, se van a comparar los datos de las temperaturas obtenidos a diferentes velocidades de corte. Para la obtención de los resultados se han realizado simulaciones con las dos herramientas modelizadas, utilizando energías de fractura diferentes y variando la velocidad de corte. En la Figura 65, como se ha comentado

anteriormente la velocidad de corte es 0.5 m/s, mientras que, la velocidad utilizada en las simulaciones de la Figura 63 ha sido de 3 m/s.

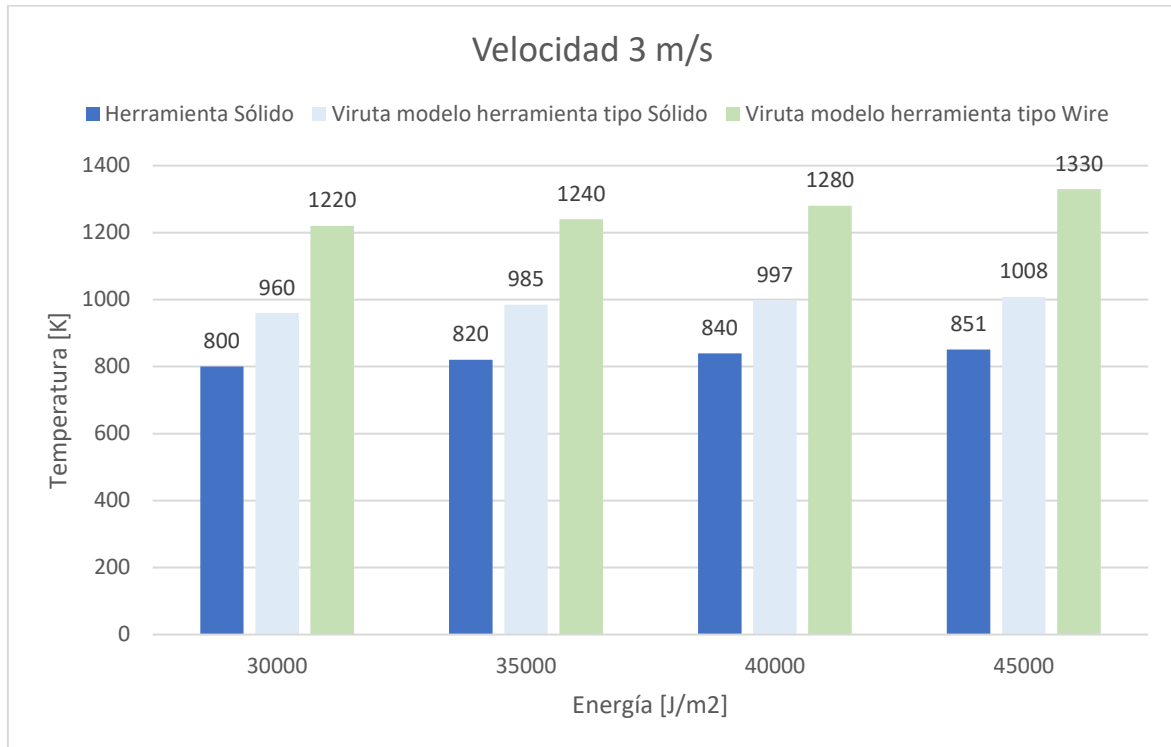


Fig. 64. Comparación de las temperaturas máximas experimentadas en el proceso de mecanizado ortogonal del Ti-6Al-4V ( $v = 3$  m/s).

Comparando los valores de las temperaturas en ambas gráficas, independientemente de la variable (Herramienta Sólido, Viruta Sólido o Viruta Wire), se observa que los valores han aumentado al aumentar la velocidad de corte. El aumento de temperatura producido en este cambio de velocidad ha sido muy pronunciado, del orden de 200 K, al aumentar la velocidad 2.5 m/s. Como se mencionó en el apartado teórico, los valores de la temperatura del Ti-6Al-4V en mecanizados de alta velocidad tienden a producir un aumento muy pequeño de su valor, en comparación a bajas velocidades de corte [5, 6]. Esta afirmación se puede observar en la Figura 65, cuya velocidad de corte es 15 m/s, el aumento de temperatura proporcional al aumento de velocidad es menor, puesto que tiende a estabilizarse.

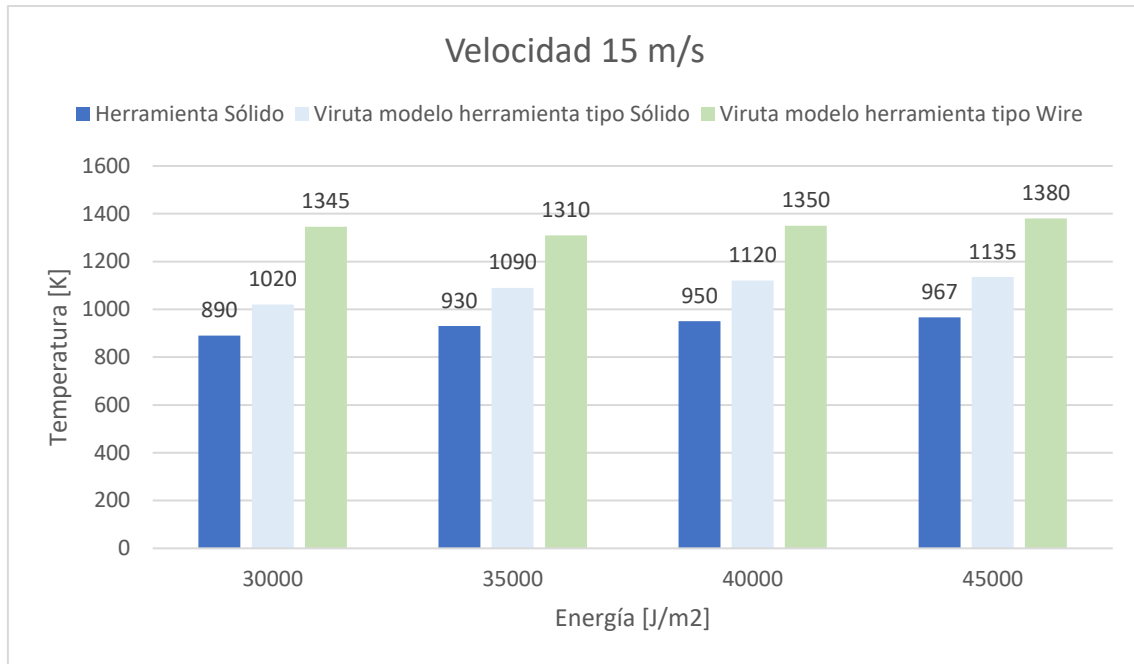


Fig. 65. Comparación de las temperaturas máximas experimentadas en el proceso de mecanizado ortogonal del Ti-6Al-4V ( $v = 15$  m/s).

El último parámetro que influye sobre la temperatura máxima de la viruta es la energía de fractura. Como se ha observado las gráficas anteriores, el aumento de la energía de fractura provoca un aumento de la temperatura máxima, tanto en la herramienta como en la viruta. Dicho aumento es más acentuado en las simulaciones realizadas con bajas velocidades de corte,  $v = 0.5$  [m/s], y menos notable cuando las simulaciones se han realizado con altos valores de velocidad de corte.

En conclusión, los parámetros de estudio que afectan a la variación de la temperatura de la viruta son la energía de fractura ( $G_f$ ) y la velocidad de corte. Experimentalmente se ha demostrado que el aumento del valor de los parámetros mencionados provoca directamente un aumento de la temperatura de la viruta. El aumento de la temperatura es más pronunciado a bajas velocidades de corte y más moderado cuando las velocidades de corte son elevadas.

Respecto a la comparación de los modelos con herramientas tipo Wire y tipo Sólido, se ha mostrado gráficamente que el modelo con herramienta tipo Sólido muestra un comportamiento similar a una herramienta real. Por otro lado, la herramienta tipo Wire no absorbe la energía desprendida en el proceso de corte, por lo tanto, la temperatura registrada en la viruta aumenta considerablemente.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se van a exponer las conclusiones obtenidas a través de los resultados de las simulaciones y se van a mostrar las posibles líneas de trabajo para investigaciones futuras sobre el mecanizado ortogonal del Ti-6Al-4V.

### 5.1 Conclusiones

Partiendo de los objetivos del proyecto y en base a los resultados obtenidos y analizados en las simulaciones, se van a dividir las conclusiones en dos grandes grupos, la optimización del modelo de simulación mediante la herramienta tipo Wire y la influencia de la energía de fractura y velocidad de corte sobre el resto de las variables de la simulación.

En primer lugar, se han cumplido los objetivos relacionados con el estudio de investigaciones anteriores. Comprendiendo las limitaciones del material y adquiriendo conocimientos sobre sus propiedades y morfología.

En segundo lugar se expondrán las conclusiones obtenidas de la optimización del modelo de simulación:

- La herramienta tipo Wire ha demostrado optimizar el tiempo de simulación del proceso de mecanizado ortogonal del Ti-6Al-4V.

El tiempo de simulación obtenido por la herramienta tipo Wire es considerablemente menor en cada uno de los modelos propuestos, por lo tanto, teniendo en cuenta el parámetro del tiempo, se ha obtenido un modelo optimizado de simulación.

- La veracidad de los resultados obtenidos con las variaciones de los diferentes parámetros ha resultado satisfactoria.

Para la realización de análisis sobre la temperatura de la viruta, el modelo basado en la herramienta tipo Wire no realiza mediciones similares a los valores reales., En referencia a los valores obtenidos en la fuerzas y formación de viruta se ha obtenido lo siguiente:

Los resultados de las fuerzas son muy similares a los resultados obtenidos mediante simulaciones con el modelo de la herramienta tipo Sólido, con una diferencia aproximada del 1%.

La viruta obtenida en estas simulaciones se caracteriza por poseer un mayor grado de segmentación que la viruta formada en una simulación equivalente utilizando la herramienta tipo Sólido.

Por último, se van a exponer las conclusiones obtenidas sobre el estudio de las fuerzas del mecanizado, la morfología de la viruta y la temperatura máxima de la viruta, tras la variación de parámetros como la energía de fractura o la velocidad de corte:

- En referencia al estudio de las fuerzas de mecanizado se han obtenido las siguientes conclusiones.

El aumento de la velocidad de corte provoca una disminución del valor de las fuerzas, fuerza de corte y fuerza de avance, cuando el aumento de la velocidad de corte se realiza en una zona de bajas velocidades la disminución de las fuerzas es más pronunciada y tiende a estabilizarse a medida que se sigue aumentando la velocidad de corte

Por el contrario, se ha demostrado, mediante el análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones, que el aumento de la energía de fractura provoca un aumento en el valor de las fuerzas de mecanizado.

- En la teoría se mostró que la morfología de la viruta formada en un proceso de mecanizado ortogonal del Ti-6Al-4V es de tipo segmentada. La influencia de la energía de fractura y la velocidad de corte afecta directamente al grado de segmentación de la misma. Provocando un mayor grado de segmentación el aumento de la velocidad de corte o la disminución de la energía de fractura de la aleación de titanio.
- Por último, las conclusiones obtenidas de la variación de la temperatura de la viruta, en función a los parámetros de velocidad de corte y energía de fractura, son las siguientes:

El aumento de la velocidad de corte provoca un aumento del valor máximo de la temperatura de la viruta, obteniendo un aumento más pronunciado en un rango de baja velocidad y aumentos moderados a medida que se continúa elevando la velocidad de corte.

El aumento de la energía de fractura provoca aumentos progresivos y moderados de la temperatura máxima de la viruta.

## 5.2 Futuras investigaciones

El objetivo de este apartado es el de proponer futuras líneas de trabajo con relación al proyecto realizado. Contextualizando, se van a proponer futuras investigaciones de la optimización del mecanizado ortogonal del Ti-6Al-4V. Respecto al objetivo de optimizar el modelo se pueden seguir dos líneas de trabajo:

- La primera opción, consiste en utilizar el presente proyecto como base teórica para el diseño de un nuevo modelo de herramienta.

Inicialmente, se analizarían los fallos de la herramienta tipo Wire y el objetivo sería el modelado de una herramienta con más rendimiento que la anterior. Para ello, el estudio tendría que modelizar una herramienta que fuera capaz de absorber la energía desprendida en forma de calor durante la operación de mecanizado. Al añadir esta propiedad a la herramienta se podrían analizar los resultados obtenidos relacionados con la morfología y el valor de la temperatura máxima alcanzada en la viruta.

En todo momento habría que tener en cuenta las mejoras aportadas en este proyecto sobre la optimización del modelo mediante la herramienta tipo Wire. Una importante reducción del tiempo de simulado y la obtención de valores de las fuerzas y morfología de viruta muy similares a los obtenidos con la herramienta tipo Sólido.

- La segunda línea de trabajo consistiría en mejorar la herramienta tipo Wire, con el fin de conseguir en el mayor número de parámetros posibles los mismos resultados que los obtenidos con la herramienta tipo Wire.

En el análisis de la morfología de la viruta, se podría comenzar la línea de investigación relacionando las energías de fractura que provocan la misma morfología de la viruta en las simulaciones de ambas herramientas.

Esta línea de trabajo solo tiene sentido que se siga si el fin del estudio no está relacionado la obtención de los valores de la temperatura, en la herramienta y en la pieza de trabajo. Debido a que la herramienta tipo Wire no sufre variaciones de temperatura y, en consecuencia, la temperatura de la viruta sufre un aumento de valor.



## 6. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

En este apartado se va a analizar el impacto ambiental relacionado con el desarrollo del presente proyecto. El impacto ambiental se puede definir como la alteración del medioambiente provocada por las actividades humanas o naturales, contextualizando, se expondrá como el impacto al medioambiente, directo o indirecto, que ha ocasionado la realización del proyecto.

La huella ecológica provocada por el proyecto se analiza mediante el volumen generado de CO<sub>2</sub>. Para la obtención de la huella ecológica se realiza un análisis aproximado del consumo eléctrico y, una vez obtenido el valor de los kilovatios hora [kWh], se realiza una operación de conversión para obtener la masa de CO<sub>2</sub> emitida.

Tras la realización del análisis del consumo eléctrico generado durante el desarrollo del proyecto, se han obtenido las siguientes conclusiones:

El ordenador es el elemento que más energía ha consumido, se trata de un ordenador de gama media-alta con uso diario de 8 horas. Teniendo en cuenta que la principal función del ordenador es la de realizar simulaciones, su consumo medio es pronunciado, aproximadamente 400 [W]. Al consumo del ordenador en funcionamiento hay que añadirle el consumo medio del monitor, aproximadamente 40 [W], obteniendo un consumo total de 440 [W]. Por último, indicar la existencia de un consumo pasivo de 4 [W] cuando el ordenador se encuentra apagado. El resto de energía consumida se debe al sistema de iluminación, compuesto por ocho bombillas tipo LED con un valor de consumo de 7 [W].

A continuación, se muestran los valores de la energía consumida durante el transcurso del proyecto y su equivalencia en kilogramos de CO<sub>2</sub>:

- Ordenador encendido:

$$Masa\ de\ CO_2 = 0.440[kW] \cdot 8 \frac{h}{día} \cdot 44\ días \cdot 0.341 \frac{Kg}{CO_2 \cdot kWh} = 52.8 [kg\ CO_2]$$

[Ec. 13]

- Ordenador apagado:

$$Masa\ de\ CO_2 = 0.004[kW] \cdot \left( 16 \frac{h}{día} \cdot 44\ días + 24 \frac{h}{día} \cdot 10\ días \right) \cdot 0.341 \frac{Kg}{CO_2 \cdot kWh} = 1.7 [kg\ CO_2]$$

[Ec. 14]

- Sistema de iluminación:

$$Masa\ de\ CO_2 = 0.007[kW] \cdot 8 \frac{h}{día} \cdot 44\ días \cdot 0.341 \frac{Kg}{CO_2 \cdot kWh} = 0.8 [kg\ CO_2]$$

[Ec. 15]

En conclusión, el impacto ambiental provocado por la realización del presente proyecto ha tenido un carácter leve, emitiendo 55.3 kilogramos de CO<sub>2</sub> al medio ambiente.

## 7. PRESUPUESTO

Este apartado está dedicado al análisis de los gastos generados durante el desarrollo del presente proyecto:

PRESUPUESTO DE PROYECTO									
<u>Autor</u> : Ismael Llorente Bermejo	<u>Departamento</u> : Ingeniería Mecánica, UC3M.								
<u>Descripción del proyecto</u> : Optimización del proceso de mecanizado del Ti-6Al-4V mediante simulación de elementos finitos.									
<u>Software</u> : ABAQUS/Explicit.									
<u>Duración</u> : 2 meses.									
<u>Resumen de costes</u> :									
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Presupuesto de Costes Totales</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Personal</td><td>23.232 €</td></tr> <tr> <td>Amortización</td><td>4.325 €</td></tr> <tr> <td>Costes indirectos</td><td>5.511 €</td></tr> </tbody> </table>		Presupuesto de Costes Totales		Personal	23.232 €	Amortización	4.325 €	Costes indirectos	5.511 €
Presupuesto de Costes Totales									
Personal	23.232 €								
Amortización	4.325 €								
Costes indirectos	5.511 €								
- I.V.A. no incluido en el precio.									
<b><u>PRESUPUESTO TOTAL</u> :</b>	<b>33.068 €</b>								

A continuación, se expone el desglose del presupuesto realizado:

Costes indirectos: 20% del presupuesto del proyecto.

Tabla 15. Presupuesto del personal implicado en el proyecto.

PERSONAL				
Apellidos, Nombre	Categoría	Dedicación [h]	Coste [€/h]	COSTE [€]
López-Gálvez Muñoz, Héctor	Ingeniero Superior	70,4	80	5.632
Llorente Bermejo, Ismael	Ingeniero	352	50	17.600
<b>TOTAL</b>				<b>23.232</b>

Tabla 16. Presupuestos de amortización de los equipos empleados durante el proyecto.

EQUIPOS				
Descripción	Coste [€]	Vida útil [años]	Amortización [%]	Coste anual de amortización [€]
Ordenador de sobremesa	1600	3	33.3	534
Licencia ABAQUS	18.000	5	33.3	3.600
Licencia Microsoft Office 365 ProPlus	155	1	100	155
<b>TOTAL</b>				<b>4325</b>

## REFERENCIAS

- [1] Y. Zhang, T.Mabrouki, D.Nelias y Y.D.Gong, «Chip formation in orthogonal cutting considering interface limiting shear stress and damage evolution based on fracture energy approach,» 2011, pp. 850-863.
- [2] W. Bai, R. Sun, A. Roy y V. V. Silberschmidt, «Improved analytical prediction of chip formation in orthogonal cutting of titanium alloy Ti6Al4V,» 2017.
- [3] T. H. Childs, P.-J. Arrazola, P. Aristimunob, A. Garay y I. Sacristan, «Ti6Al4V metal cutting chip formation experiments and modelling over a wide range of cutting speeds,» 2018.
- [4] F.Ducobu, E.-L. y E.Filippi, «Material constitutive model chip and chip separation criterion influence on the modeling of Ti6Al4V machining whit experimental validation in strictly orthogonal cutting condition,» 2016.
- [5] H. L.-G. J.-Á. X.Soldani, «Numerical modeling of instabilities during machining of aeronautical alloy,» 2017, pp. 36-42.
- [6] P.J.Arrazola, A.Garay, L.M.Iriarte, M.Armendia, S.Marya y F.LeMaître, «Machinability of titanium alloys (Ti-6Al-4 and Ti555.3),» de *Journal of materials processings technology*, 2009, pp. 2223-2230.
- [7] T. F. T. Association, «<http://www.titane.asso.fr/markets-and-applications.html>,» 09 2013. [En línea].
- [8] DestefaniJ., «Introduction to titanium and titanium alloys, properties and selection : nonferrous alloys and special-purpose material,» ASM HANDBOOK, 1990.
- [9] C. Y, «Proprieties du titane et de ses alliages,» 2013.
- [10] T. A. H. comitte, «Fatigue and fracture properties of titanium alloys,» ASM INTERNATIONAL, 1997.
- [11] P. Oxley y C. Ellis Horwood, « Mechanics of Machining,» 1989, p. Ch. 4..
- [12] Molinari, C. Musquar y G. Sutter, «Int.J. Plastic,» 2002, pp. 443-459.

- [13] J. M. Romero, «"Formulación de un algoritmo eficiente de integración de un modelo de daño isótropo y validación en condiciones dinámicas",» Carlos III de Madrid University, 2016.
- [14] S. MG y O. P. ., «An experimental investigation of the influence of strain-rate and temperature on the flow stress properties of a low carbon steel using a machining test.,» 1970, pp. 41-754.
- [15] C. Leyens, M. Peters y WileyVCH, «Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications».
- [16] P. Voillot, «Cristales maclados de rutilo».
- [17] U. P. d. Valencia, «Aleaciones para ingeniería: Aleaciones ligeras».
- [18] R. B. NB Pilling, "La oxidación de los metales a altas temperaturas". J. Inst. Met 29 , p. 529-591., (1923).
- [19] S. Ortolá, «Manual del Titanio y sus Aleaciones,» 2012.
- [20] P. Arrazola, A. Garay, I. Sacristán, L. Iriarte y D. Solee, «Mecanizado de aleaciones de titanio empleadas en aeronáutica,» Mondragon Unibertsitatea.
- [21] M. M. M. Cuadrado, *MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE LOS FENÓMENOS EN CORTE ORTOGONAL DEL Ti6Al4V*, 2010.
- [22] «<http://www.evek.es/reference/titan-v-ximicheskoy-i-nefteximicheskoy-promyshlennosti.html>,» [En línea].
- [23] R. U. Arechaga y I. Industrial, «Materiales de alto rendimiento en el sector aeronáutico.,» 2012.
- [24] H. Hansman, «smithsonian,» 24 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.smithsonianmag.com/innovation/we-can-now-3d-print-ribs-180956673/>. [Último acceso: 25 Abril 2018].
- [25] «chainreactioncycles,» [En línea]. Available: <http://www.chainreactioncycles.com/es/es/cuadro-de-titanio-lynskey-mt29-2016/rp-prod144215>. [Último acceso: 25 Abril 2018].
- [26] I. G. Castro, «Introducción al Mecanizado de Alta Velocidad».

- [27] U. d. N. Laboratorio de control y sistemas de fabricación, «Introducción a la electroerosión.».
- [28] «Maquinas y herramientas,» 27 Enero 2011. [En línea]. Available: <http://www.demaquinasyherramientas.com/maquinas/centro-mecanizado>. [Último acceso: 30 Abril 2018].
- [29] S. Coromant, «Guía Técnica de Mecanizado. AB Sandvik Coromant,» 2005.
- [30] M. Sivak, D. Martinez Krahmer y G. Maceira, «El mecanizado de alta velocidad (MAV),» 2002.
- [31] P. y. Oxley, Mechanics of the ortogonal machining, 1943.
- [32] T. U. o. Waikato, «Arranque de virutas - Máquinas herramienta,» 2000.
- [33] S. R. S. Serope Kalpakjian, Manufactura, ingeniería y tecnología, 2002.
- [34] J. L. C. J. A. C. J. G. F. Kalpakjian libro. M<sup>a</sup> Henar Miguélez, Problemas resueltos de Tecnología de Fabricación, Thomson Paraninfo, 2005.
- [35] C. B. S. Pérez Vidal, Sistemas y Automática, Tecnología de Fabricación y Tecnología de Maquinas, Elche, 2007.
- [36] S. Hoppe, Experimental and numerical analysis of chip formation in metal cutting., 2003.
- [37] R. G. X. F. R. S. I. J. A.K. Balaji., Manufacturing Engineering Research Digest. Series Performance-Based Predictive, 2006.
- [38] S. K. y. S. R. Schmid, «Manufactura, ingeniería y tecnología,» 2008, 5<sup>a</sup> ed., México: Pearson Educación.
- [39] M. S. Tugrul Ozel, «<https://www.sciencedirect.com/>,» 05 02 2014. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452303816301194>.
- [40] M. C. D. G. F. Calamaz, A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti-6Al-4V, 2008.
- [41] 3DCADPortal, «<http://www.3dcadportal.com/abaqus-simulia.html>,» [En línea].

- [42] M. G. A. I. L.-M. A. P.-J. Armendia, «Comparison of the machinabilities of Ti6Al4V and Timetal54M using uncoated WC-Co tools,» de *ournal of Materials Processing Technology*, 2010, pp. 210: 197-203.
- [43] X. L. R.-C. Yang, «Machining titanium and its alloys; Machining Science and Technology, 3(1):107-139.,» 1999, pp. 3:107-139..
- [44] D. Umbrello, «"Finite element simulation of conventional and high speed machining of Ti6Al4V alloy"; Journal of Materials Processing Technology,» 2008, pp. 80-88.

## Anexos

### Anexo 1. Tipología de fresas según uso necesario.

